



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLIV CHEMICKÉHO SLOŽENÍ NA SVAŘITELNOST KONSTRUKČNÍCH OCELÍ

INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION ON WELDABILITY OF STRUCTURAL STEELS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jaromír Kachlír

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Mojmír Vaněk

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Jaromír Kachlíř**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Mojmír Vaněk**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vliv chemického složení na svařitelnost konstrukčních ocelí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedním z hlavních faktorů, které ovlivňují svařitelnost konstrukčních ocelí, je chemické složení. U mnoha materiálů je však v normách stanoven značně široký rozsah chemického složení, případně bývají stanoveny jen maximální povolené obsahy některých prvků. Stejně označené materiály od různých výrobců tedy mohou vykazovat různou svařitelnost a různé vlastnosti, což může způsobovat komplikace v reálné i virtuální výrobě.

Cíle bakalářské práce:

- Provést základní přehled značení ocelí dle platných norem pro zvolené oceli.
- Popsat jejich vlastnosti, použití a svařitelnost.
- Popsat vliv jednotlivých prvků na vlastnosti a svařitelnost.
- Porovnat konkrétní vzorky materiálu vzájemně a s příslušnou normou.

Seznam doporučené literatury:

ASM Handbook Volume 6: Welding, brazing and soldering. 10th ed. Materials Park, OH, USA: ASM International, 1993, 1299 s. ISBN 0-87170-382-3.

FOLDYNA, Václav et al. Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s. ISBN 80-857771-85-3.

FÜRBAACHER, Ivan. Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty. Praha: Dashöfer, 1998. ISBN 80-86229-02-5.

HRIVŇÁK, Ivan. Zváranie a zvariteľnosť materiálov. Vyd. 2. Bratislava: Citadella, 2013, 486 s. ISBN 978-80-89628-18-6.

MESSLER, Robert W. Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy.
New York, USA: John Wiley & Sons, 1999, 662 s. ISBN 04-712-5376-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

KACHLÍŘ Jaromír: Vliv chemického složení na svařitelnost konstrukčních ocelí.

Práce se zabývá vlivem chemického složení na svařitelnost konstrukčních ocelí S355, S275 a S235. Úvod práce pojednává o značení ocelí dle norem EN 10027 a ČSN 42 0002. Dále se okrajově zabývá problematikou uhlíkových ekvivalentů, teploty předehřevu a vzniku martenzitu při svařování. V další části je rozebrán vliv jednotlivých chemických prvků na vlastnosti ocelí a jejich svařitelnost. Druhá polovina práce obsahuje zhodnocení vzorků zkoumaných ocelí, kde jsou vyhodnocovány mechanické vlastnosti, chemické složení a další charakteristiky ocelí. Vzorky ocelí jsou porovnávány jak v rámci vlastní skupiny ocelí, tak i vzájemně s ostatními typy ocelí.

Klíčová slova: ocel S355, ocel S275, ocel S235, teplota předehřevu, chemické složení ocelí

ABSTRACT

KACHLÍŘ Jaromír: Influence of Chemical Composition on Weldability of Structural Steels.

This work deals with the influence of chemical composition to weldability of construction steel S355, S275 and S235. The introduction is about marking steel according to norms EN 10027 and CSN 42 0002. It also marginally deals with the problematic of carbon equivalents, temperature of preheat and generation of martensite during welding. The second half contains the evaluation of the examined steel samples. I focus mostly on mechanical properties, chemical composition and other steel characteristics. All the samples are compared both to the other steels in its group and amongst each other.

Keywords: steel S355, steel S275, steel S235, temperature of preheat, chemical Composition of steel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KACHLÍŘ, Jaromír. *Vliv chemického složení na svařitelnost konstrukčních ocelí*. Brno, 2017. 49s, 3 přílohy, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce Ing. Mojmír Vaněk.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 26. 5. 2017

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto vřele děkuji panu Ing. Mojmiru Vaňkovi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

1 ZNAČENÍ A DĚLENÍ OCELÍ	11
1.1 Značení dle EN	12
1.2 Značení dle ČSN	13
2 VLASTNOSTI A SVAŘITELNOST KONSTRUKČNÍCH OCELÍ	18
2.1 Uhlíkový ekvivalent	18
2.2 ARA diagram	19
2.3 Studené trhliny	21
2.4 Teplota přehřevu	22
3 VLIV JEDNOTLIVÝCH PRVKŮ NA VLASTNOSTI A SVAŘITELNOST OCELÍ	23
3.1 Uhlík	23
3.2 Mangan	24
3.3 Křemík	25
3.4 Ostatní legury	25
3.5 Fosfor	25
3.6 Síra	26
3.7 Kyslík	26
3.8 Dusík	27
3.9 Vodík	27
4 VYHODNOCENÍ KONSTRUKČNÍCH OCELÍ	28
4.1 Ocel S355	28
4.1.1 Chemické složení ocelí S355	28
4.1.2 Mechanické vlastnosti ocelí S355	33
4.1.3 Diskuse výsledků ocelí S355	34
4.2 Ocel S275	35
4.2.1 Chemické složení ocelí S275	35
4.2.2 Diskuse výsledků ocelí S275	39
4.3 Oceli S235	40
4.3.1 Chemické složení ocelí S235	40
4.3.2 Mechanické vlastnosti ocelí S235	43
4.3.3 Diskuse výsledků ocelí S235	43
4.4 Vzájemné porovnání ocelí S355, S275 a S235	44
4.4.1 Vzájemné porovnání chemického složení ocelí S355, S275 a S235 a závislých charakteristik	45
4.4.2 Vzájemné porovnání mechanických vlastností ocelí S355, S275 a S235	47
5 ZÁVĚRY	49

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam grafů

Seznam příloh

ÚVOD [48] [23]

Svařitelnost konstrukčních ocelí je ovlivňována mnoha faktory. Jedním z hlavních faktorů je chemické složení těchto ocelí. To je určeno u mnoha materiálů normami, které však stanovují příliš široký rozsah obsahů prvků v ocelích nebo stanovují jen maximální povolené obsahy. To vede k rozdílným vlastnostem a chování při svařování u stejně označených ocelí. Tento jev může vést ke komplikacím až už v reálné či virtuální výrobě.

Cílem práce bylo mimo jiné provést základní přehled značení konstrukčních ocelí a popsat jejich vlastnosti a svařitelnost. Dále pak popis vlivů prvků na tyto oceli a hlavně vyhodnocení jednotlivých typů ocelí z hlediska vlivu jejich chemického složení na svařitelnost a další charakteristiky a vzájemné porovnání těchto zkoumaných typů ocelí.

Práce se tedy zabývá jak vlivem jednotlivých prvků na svařitelnost a vlastnosti ocelí, tak i vyhodnocuje zastoupení těchto prvků u konkrétních vzorků materiálů. Dále jsou sledovány vlivy chemického složení ocelí na teplotu předehřevu nebo na teploty martenzitu start M_s a martenzitu finish M_f .

1 ZNAČENÍ A DĚLENÍ OCELÍ [73] [61] [60] [48]

Na světovém trhu se vyskytuje celá řada nejrůznějších druhů ocelí. Pro snadnější orientaci v tomto množství nabízených produktů bylo ustanoveno několik norem, podle kterých jsou konkrétní oceli označeny. Práce se zabývá značením dle České státní normy ČSN 42 0002: 1976, která je využívána pro český trh s ocelí. Dále se práce věnuje značení dle nadnárodní, evropské normy EN 10027.

Oceli je možné rozdělit dle nejrůznějších hledisek, jako například podle:

- Způsobu výroby (EOP, kyslíkový konvertor atd)
- Využití (na odlitky, k tváření)
- Účelu užití (konstrukční, nástrojová)
- Úrovně legování (nelegovaná, legovaná)

Oceli se dělí dle různých hledisek. Jedním z nejběžnějších je však rozdělení dle využití. Zkoumané konstrukční oceli spadají spolu s ocelmi nástrojovými mezi tzv. oceli ke tváření. Tyto oceli tvoří přes 95% celkové produkce ocelí, přičemž právě konstrukční oceli tvoří jejich podstatnou část.

Konstrukční oceli lze dále dělit dle jejich chemického složení na oceli nelegované a legované. Přičemž nelegované oceli se dělí na oceli obvyklých jakostí, oceli nelegované ušlechtilé a nelegované jakostní oceli. Legované oceli lze rozdělit na legované jakostní oceli a legované ušlechtilé oceli.

Nelegované oceli jsou oceli, ve kterých obsahy jednotlivých prvků nedosahují maximálního procentuálního zastoupení v obsahu oceli. Tyto oceli jsou někdy také označovány jako oceli uhlíkové z důvodu nízkého obsahu ostatních prvků. Nejsou určeny k tepelnému zpracování vyjma tepelného žíhání.

Legované oceli jsou takové oceli, v jejichž složení dosahuje nebo překračuje alespoň jeden z prvků svůj mezní obsah (viz tab. 1). Tento mezní obsah se udává v hmotnostních procentech.

Tab. 1 Klasifikace nelegovaných ocelí [81].

Značka	Název	Hmotnostní %	Značka	Název	Hmotnostní %
<i>Al</i>	<i>Hliník</i>	0,10	<i>Ni</i>	<i>Nikl</i>	0,30
<i>B</i>	<i>Bór</i>	0,0008	<i>Pb</i>	<i>Olovo</i>	0,40
<i>Bi</i>	<i>Bismut</i>	0,10	<i>Se</i>	<i>Selen</i>	0,10
<i>Co</i>	<i>Kobalt</i>	0,10	<i>Si</i>	<i>Křemík</i>	0,50
<i>Cr</i>	<i>Chrom</i>	0,30	<i>Te</i>	<i>Tellur</i>	0,10
<i>Cu</i>	<i>Měď</i>	0,40	<i>Ti</i>	<i>Titan</i>	0,05
<i>La</i>	<i>Lanthanoidy</i>	0,05	<i>V</i>	<i>Vanad</i>	0,10
<i>Mn</i>	<i>Mangan</i>	1,65	<i>W</i>	<i>Wolfram</i>	0,10
<i>Mo</i>	<i>Molybden</i>	0,08	<i>Zr</i>	<i>Zirkonium</i>	0,05
<i>Nb</i>	<i>Niob</i>	0,06		<i>Ostatní prvky (vyjma C, P, S, N)</i>	0,05
<i>Pozn.: Pokud je pro obsah Mn udána pouze nejvyšší hodnota, platí jako mezní obsah 1,80 hmotnostního procenta</i>					

Zkoumané nelegované konstrukční oceli spadají do kategorií s předepsanými mechanickými vlastnostmi i s předepsaným chemickým složením. Co se týká úrovně legování zkoumaných ocelí, spadají mezi oceli nelegované až nízkolegované.

Nízkolegované oceli se dělí na oceli legované Cr a Mo (kde je obsah Cr v intervalu 0,80 až 2,50 %, obsah Mo je 0,15 až 1,20 %) a na oceli, které dále obsahují Ni. Na vlastnosti této skupiny ocelí má největší vliv obsah uhlíku.

1.1 Značení dle EN

Toto evropské značení ocelí lze rozdělit dle dvou kritérií a to podle použití a mechanických nebo fyzikálních vlastností nebo podle chemického složení. Tato práce se bude blíže zabývat prvním případem, tedy označováním ocelí v závislosti na jejich použití a jejich mechanických vlastnostech.

Schéma značky se sestává ze základních symbolů a přídatných symbolů pro ocel (tab. 2). Přičemž základní symboly obsahují písmeno a hodnotu mechanické vlastnosti (trojmístné číslo minimální meze kluzu v MPa pro minimální rozsah tloušťky výrobku. Přídatné symboly obsahují dvě položky, označené jako skupina 1 a skupina 2. Toto označení konkretizuje vlastnosti nebo úpravu dané oceli.

Tab. 2 Schéma značky dle evropského značení [73].

Základní symboly		Přídatné symboly	
Písmeno	Mechanické vlastnosti	Skupina 1	Skupina 2

Písmena i čísla se píšou bez mezer, stejně tak i přídatné symboly. Přídatné symboly skupiny 2 mohou být navázány pouze na symboly skupiny 1. Jedná-li se o ocel na odlitky, je před počáteční písmeno dosazeno písmeno G, což však není případ zkoumaných konstrukčních ocelí.

Je-li použito značení ocelí podle využití a mechanických nebo fyzikálních vlastností, pak písmeno základního symbolu označuje použití ocelí, konkrétně:

- S – konstrukční oceli
- P – oceli pro tlakové nádoby
- E – oceli na strojní součásti
- B – oceli pro výztuže betonu
- D – oceli pro ploché výrobky pro tváření za studena

Je-li však použito značení podle chemického složení oceli, pak se na pozici písmene základního symbolu objevují tyto znaky:

- C – souvisí s obsahem uhlíku, toto označení je používáno pro nelegované oceli (kromě automatových) se středním obsahem Mn < 1%
- X – značí, že obsah alespoň jednoho legujícího prvku překročil hranici 5%; je používáno pro korozivzdorné a legované oceli (kromě rychlořezných)
- HS – označení rychlořezných ocelí
- nn – nelegované oceli se středním obsahem Mn nad 1% nebo nelegované automatové oceli a legované oceli se středními obsahy prvků pod 5%; číslo vyjadřuje stonásobek střední hodnoty uhlíku v oceli

Označení probíraných konstrukčních ocelí začíná tedy vždy písmenem S. Následuje trojčíslí vyjadřující mechanické vlastnosti ocelí, konkrétně mez kluzu v MPa pro nejmenší rozsah tloušťky výrobku.

Například označení S275 značí konstrukční ocel s minimální mezí kluzu 275 MPa. E355 pak označuje ocel na strojní součástky s mezí kluzu 355 MPa.

Druhou polovinu značky ocelí podle využití a mechanických nebo fyzikálních vlastností tvoří přídatné symboly rozdělené do dvou skupin. Skupina 1 udává u konstrukčních ocelí jmenovitou nárazovou práci za daných teplot, popřípadě určuje zpracování oceli (tab. 3)

Tab. 3 Význam přídatných symbolů skupiny 1 pro značení konstrukčních ocelí [72].

Přídavné symboly (pro oceli)				
Skupina 1				
Nárazová práce			Zkušební teplota [°C]	A – precipitačně vytvrzeno ¹⁾ M – termomechanicky válcováno ¹⁾ N – normalizačně žíháno či válcováno ¹⁾ Q – zušlechťeno ¹⁾ G – jiné charakteristiky (následuje jedna nebo dvě číslíce)
27 J	40 J	60 J		
JR	KR	LR	+20	
J0	K0	L0	0	
J2	K2	L2	-20	
J3	K3	L3	-30	
J4	K4	L4	-40	
J5	K5	L5	-50	
J6	K6	L6	-60	
¹⁾ Platí pouze pro jemnozrnné oceli				

Skupina 2 se zabývá bližší specifikací daných ocelí, jako je konkrétní využití, vhodnost pro další úpravy atd. (tab. 4).

Tab. 4 Význam přídatných symbolů skupiny 2 pro značení konstrukčních ocelí [72].

Skupina 2
C – se zvláštní tvářitelností za studena
D – pro žárové pokovování ponorem
E – pro smaltování
F – pro kování
H – duté profily
L – nízké teploty
M – termomechanicky válcováno
N – normalizačně žíháno
Q – zušlechťeno
T – na trubky
W – odolné vůči atmosférické korozi
an – další předepsané prvky (např. Cu) spolu s předepsaným číslem, které odpovídá desetinásobku střední hodnoty předepsaného rozsahu pro obsah prvku

Z výše uvedeného vyplývá, že například ocel S235JR je nelegovanou konstrukční ocelí s dolní mezí kluzu $R_{eL} = 235 \text{ MPa}$ a s nárazovou prací $KV = 27 \text{ J}$ při $+20 \text{ °C}$. Pro další ze zkoumaných ocelí S355J2 lze vyčíst, že se jedná taktéž o konstrukční ocel s dolní mezí kluzu $R_{eL} = 355 \text{ MPa}$ a s nárazovou prací $KV = 27 \text{ J}$ při -20 °C .

1.2 Značení dle ČSN

Číselné značení ocelí ke tváření dle normy ČSN 42 0002-76 vychází ze základní pětimístné značky oceli a doplňkového dvojčíslí, které je od základní značky odděleno tečkou (tab. 5). Za tyto doplňkové číslice může být umístěno označení způsobu výroby.

První dvojčíslí označuje třídu oceli. Na prvním místě je vždy číslice 1, která říká, že se jedná o tvářenou ocel. Na druhé pozici se vyskytují číslice od 0 do 9, vyjma číslice 8 (třídou 18 se označují slinuté karbidy). Každá třída oceli je specifická a vyznačuje se odlišnými vlastnostmi a použitím (tab. 6).

Tab. 5 Schéma číselného označování ocelí dle ČSN [74].

Základní značka					Doplňkové dvojčíslí	
X	X	X	X	X	.	X
Třída oceli	Informace závislá na třídě oceli	Informace závislá na třídě oceli	Pořadová číslice		Stav oceli	Stupeň přetváření

Význam třetí a čtvrté číslice základní značky se liší podle třídy ocele. Pro třídu 10 vyjadřuje třetí a čtvrtá číslice desetinnou hodnotu pevnosti v tahu. Výjimkou je betonářská ocel, kdy toto dvojčíslí udává desetinnou hodnotu nejmenší meze kluzu. Podobně je tomu u ocelí třídy 11. Zde platí výjimka pro automatové oceli, kde třetí číslice nabývá hodnoty 1, označuje ocel obzvláště vhodnou pro obrábění. Čtvrtá číslice pak vyjadřuje desetinu procenta střední hodnoty uhlíku v oceli zaokrouhlené na celé číslo (je-li obsah C pod 0,1%, používá se číslice 0). U ocelí třídy 12 je třetí číslice většinou 0. U ocelí třídy 13 až 16 určuje třetí číslice sumu středních obsahů legovacích prvků v procentech. Čtvrtá číslice vyjadřuje jako u ocelí třídy 11 střední obsah uhlíku v desetinách procenta. Tento obsah se však zaokrouhluje od číslice 3 na vyšší desetinné číslo (např.: Je-li obsah C 0,13%, zaokrouhlí se na 0,2% a čtvrtá číslice bude mít hodnotu 2). Třetí číslice vyjadřuje u ocelí třídy 17 způsob legování (tab. 7).

Tab. 6 Charakteristika tříd ocelí [74].

Třída oceli	Označení dle		Charakteristika	Využití
	použití	stupně legování		
10 xxx	konstrukční	nelegované	Oceli bez předepsaného chemického složení, ale s předepsanými mechanickými vlastnostmi	Používají se pro mostní a jeřábové konstrukce, dále jako výztuže betonu a tzv. roxory pro jejich dobrou svařitelnost.
11 xxx			Oceli s předepsaným chem. složením pro C, P, S, (popř. P+S) a s předepsanými hodnotami mech. vlastností	Jsou využívány jako vřetena, hřídele nebo ozubená kola. Automatová ocel se vyznačuje dobrou obrobitelností.
12 xxx			Oceli s předepsanými hodnotami C, P, (P+S), ale i dalších prvků jako jsou Mn, Si; pro určitý rozměr a tep. zprac. se zaručují mech. vlastnosti	Využívají se jako hřídele elektromotorů a pro dynamy, dále jako rotory malých turbogenerátorů.
13 xxx		legované	Jedná se o oceli legované prvky Mn nebo Si, popřípadě oběma	Jsou známy jako oceli pružinové pro velmi namáhané pružiny. Často zastupují nákladnější chromovou ocel.
14 xxx			Oceli legované Cr, popřípadě Cr+Mn nebo Si a Al	Využívány zejména jako kuličková a válečková ložiska. Je kladen veliký důraz na mikročistotu.
15 xxx			Legované nejčastěji Cr a V, popřípadě Mo nebo W	Používají se pro vysokotlaké nádoby, kotle, parní turbíny, trubky díky jejich žárupevnosti.
16 xxx			Jedná se o nízko a středně legované oceli Ni, Cr, Mo, V nebo W	Jedná se o nejjakostnější oceli používané pro vysoce namáhané strojní součásti.
17 xxx			Vysokolegované oceli Cr, popř. Cr+Ni nebo dalším prvky	Jsou to korozivzdorné a žáruvzdorné oceli využívány pro potravinářský průmysl, nožířství, zdravotnictví
19 xxx	nástrojové	nelegované	Oceli s předepsanými obsahy C, Mn, Si, P, S	Různé možnosti využití od nožů, přes vrtáky a závitníky až po protahovací trny a výstružníky.
		legované	Velká škála legujících prvků; rozlišujeme nízko, středně a vysokolegované	

Tab. 7 Význam třetí číslice pro značení ocelí třídy 17 [72].

Číselná značka	Význam třetí číslice
17 0xx	Chromové oceli
17 1xx	Chromové oceli s přísadovými prvky Al, Mo, Ni
17 2xx	Chromniklové oceli, popřípadě dále stabilizované Ti nebo Nb
17 3xx	Stabilizované chromniklové oceli s dalšími prvky jako Mo, V, W atd.
17 4xx	Manganochromové a manganochromniklové oceli
17 5xx	Niklové oceli
17 6xx	Manganové oceli
17 7xx	Volné
17 8xx	
17 9xx	

Čtvrtá číslice vyjadřuje u ocelí třídy 17 koncentraci hlavních legujících prvků, jako jsou Cr, Mn a Ni (tab. 7). U ocelí třídy 19 zastupuje třetí číslice nelegované oceli nebo typ legování (tab. 8).

Tab. 8 Význam třetí číslice pro značení ocelí třídy 19 [72].

Číselná značka	Význam třetí číslice	
19 0xx	Dvojčíslí utvořené třetí a čtvrtou číslicí vyjadřuje střední obsah uhlíku (pro nelegované oceli)	Nástrojové uhlíkové oceli
19 1xx		
19 2xx		
19 3xx	Manganové, křemíkové a vanadové oceli	Nástrojové legované oceli
19 4xx	Chromové oceli	
19 5xx	Chrommolybdenové oceli	
19 6xx	Niklové oceli	
19 7xx	Wolframové oceli	
19 8xx	Rychlořezné oceli (HSS)	
19 9xx	Speciální oceli	

Čtvrtá číslice základní číselné značky má u legovaných ocelí třídy 19 funkci pořadovou. Pátá číslice slouží k odlišení blízkých ocelí a má pořadovou funkci. Význam doplňkových číslic je v označení druhu tepelného zpracování a stupně přetvářené oceli.

Označení způsobu výroby se může vyskytovat za doplňkovými značkami. Je označován velkými písmeny dle názvu výroby ocelí (tab. 10).

Tab. 9 Označení způsobů výroby ocelí [72].

Značka	Ocel dle výroby	Značka	Ocel dle výroby
M	Martinská ocel	E	Elektroocel
KK	Kyslíková konvertorová ocel	KT	Kyslíková tandemová ocel
ESP	Elektrostrusková přetavená ocel	VOP	Vakuově přetavená ocel

Kromě těchto norem pro značení ocelí se v praxi vyskytuje celá řada norem dalších, ať už německé DIN nebo W.-nr., čínské GB nebo francouzské AFNOR a další. Ekvivalenty zkoumaných ocelí jsou shrnuty v následující tabulce (tab. 11).

Tab. 10 Příklady ekvivalentů konstrukčních ocelí [23], [83], [59].

Značení dle EN	Značení dle ČSN	Značení dle DIN	Číslo materiálu W. Nr
S235JR	11 375	St 37-2	1.0038
S235J0	11 378	St 37-3 U	1.0114
275JR	11 443	St 44-2	1.0044
275J2H	11 448	RoSt 44-3	1.0138
S355J2	11 503	-	1.0577
S355J0	11 523	St 52-3 U	1.0553
S355J2G3	11 523	St 52-3	1.0570

2 VLASTNOSTI A SVAŘITELNOST KONSTRUKČNÍCH OCELÍ [48], [40], [19]

Svařitelnost ocelí je charakteristika, která udává, zda-li je daný materiál vhodný pro požadovaný svařenec. Tato charakteristika je ovlivněna celou řadou faktorů, ať už materiálových, chemických nebo konstrukčních. Konkrétně jsou to například chemické složení oceli, stav materiálu, metoda svařování, následné tepelné zpracování, umístění svaru nebo tloušťka materiálu. Se svařitelností ocelí blízce souvisí uhlíkový ekvivalent (viz kap. 2.1).

Při svařování konstrukcí z konstrukčních či vysocepevných ocelí je nutné dbát na požadavky pro tyto konstrukce. Je důležité, aby tyto konstrukce odpovídaly příslušným normám před i po jejich zhotovení. Tedy aby nebyly svařováním natolik ovlivněny, že by se staly nevyhovujícími. Takové konstrukce jsou rozdělovány dle teplotních podmínek provozu do tří skupin:

- Pro práci za běžných atmosférických teplot (všeobecné použití)
- Pro práci za snížených teplot (do -30°C)
- Pro práci za nízkých teplot (-30 až -90°C)

Konstrukční a vysocepevné oceli jsou dle normy ČSN EN 288-3 rozděleny do skupin 1 až 11. Z těchto skupin jsou pro svařované konstrukce doporučovány oceli se zaručenou mezí kluzu R_e , která je menší nebo rovna 360 MPa a normalizačně žíhány. Dále pak jemnozrnné oceli zpracované termochemicky se zaručenou mezí kluzu $R_e > 360$ MPa.

Pro svařované konstrukce pro všeobecné použití se používají oceli tříd S235, S275, S355 atd. Jakostní stupeň oceli by měl zaručovat nárazovou práci KV = 27J nebo 40J při teplotách od -20 do 20°C. To odpovídá přídatným symbolům JR, JO, J2 a K2 (podle ČSN EN 10027). Pro tyto oceli je vyžadována stejná houževnatost jak ve svarovém kovu, tak v oceli. Dále je vyžadováno, aby hodnoty R_e a R_m svarového kovu vzniklého z přídatného materiálu odpovídaly hodnotám základního materiálu. Svařuje se buď bez předehřevu, nebo s předehřevem pro větší tloušťky svaru. V tom případě je nutné i žíhání sloužící ke snížení vnitřního pnutí.

2.1 Uhlíkový ekvivalent [78]

Jedním z aspektů umožňujících posoudit vlastnosti oceli je uhlíkový ekvivalent. Pomocí uhlíkového ekvivalentu lze určit svařitelnost jak ocelí nelegovaných, tak i ocelí nízkolegovaných a středně legovaných. Obsahují-li oceli méně, než 0,22 hm. % C, pak lze svařovat tyto oceli bez zvláštních opatření. Uhlíkový ekvivalent C_e nesmí překročit hodnotu 0,5 %, aby byla ocel svařitelná, a je počítán dle rovnice:

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024 \cdot s \quad [\%] \quad (2.1)$$

kde: s ... tloušťka plechu (mm)

Tento vztah platí pouze pro oceli s maximální hodnotou jednotlivých prvků dle tab. 11.

Tab. 11 Hodnoty maximálních obsahů prvků pro oceli vyhovující výpočtu C_e dle (2.1) [48].

Prvek	C	Mn	Cr	Ni	V	Cu
Max. obsah [hm. %]	0,22	1,6	1,0	3,0	0,14	0,30

Mezinárodním svářečským institutem (IIW/IIS) byl zaveden vzorec jiný, vyhovující ocelím s obsahem uhlíku nad 0,18 hm. %.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad [\text{hm. \%}] \quad (2.2)$$

Pro oceli s pevností nižší než 700 MPa nejsou při svařování nutná zvláštní opatření jako je předehřev či dohřev, pokud splňují parametry definované tabulkou (tab. 12).

Tab. 12 Mezní hodnoty ocelí, pro něž není třeba zvláštních opatření při svařování [48].

R_m [MPa] (nizkouhlikové a nizkolegované C-Mn oceli)	C [hm. %]	CE_(PW) [hm. %]	Tloušťka [mm]
370 – 520	≤ 0,22	≤ 0,41	≤ 25
500 – 700	≤ 0,20 ≤ 0,20	≤ 0,45 ≤ 0,41	≤ 25 25 – 37

Uhlíkový ekvivalent je využíván pro výpočet teploty předehřevu. Ta závisí na více faktorech, ale především na chemickém složení oceli, které vyjádří právě tento ekvivalent. Kromě teploty předehřevu jsme pomocí uhlíkového ekvivalentu schopni přibližně určit očekávanou tvrdost oceli v tepelně ovlivněné oblasti. Výrazů pro uhlíkový ekvivalent je mnoho, práce se zabývá dvěma konkrétními, normovanými ekvivalenty. Jsou to již zmíněný CE, který se používá pro válcované plechy a ekvivalentem CET, jež se používá pro plechy zušlechtnuté a počítá se dle vztahu:

$$CET = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad [\text{hm. \%}] \quad (2.3)$$

Oba tyto ekvivalenty lze použít pro oceli dosahujících maximálních obsahů prvků definovaných tabulkou (tab. 13).

Tab. 13 Maximální hodnoty prvků v ocelích přípustných pro použití CE a CET [48].

Prvek	C	Si	Mn	Cr	Cu	Mo	Ni	V
Max. obsah [hm. %]	0,22	0,80	1,70	0,90	1,0	0,75	2,5	0,20
Pozn.:	Pro CET ekvivalent je ještě podmínka maximálních obsahů pro Nb (0,06%) a Ti (0,12%)							

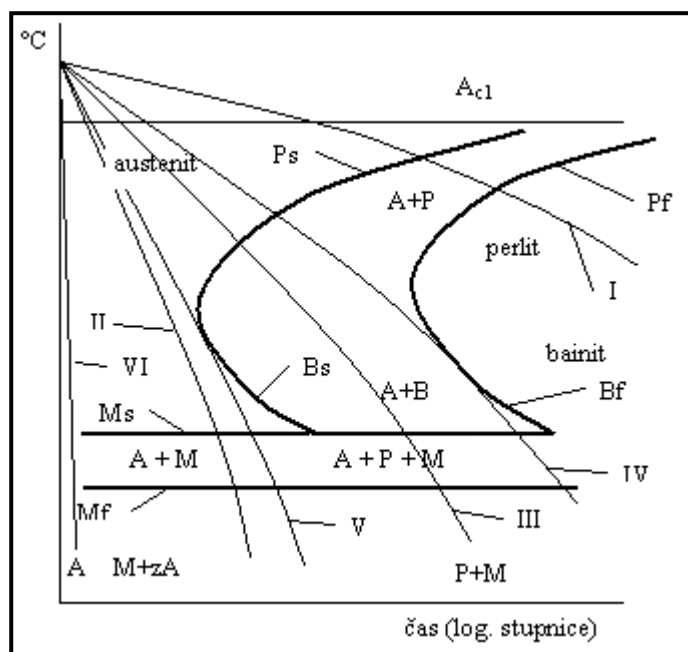
Samostatný uhlíkový ekvivalent však přímo o hodnotě teploty předehřevu nevyovídá. Je potřeba brát v potaz další faktory, zejména pak vliv difuzního vodíku ve svařované oceli. Více o vlivu vodíku na poruchy svařování v kapitole 3.9.

2.2 ARA diagram [45], [30]

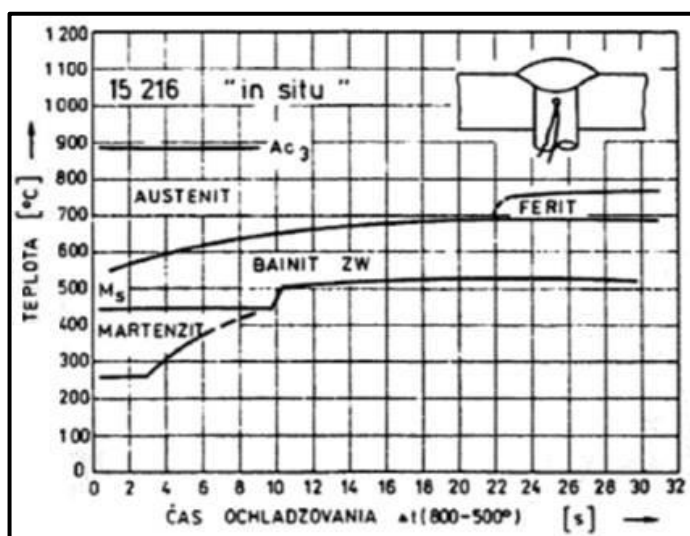
ARA diagram popisuje anizotermický rozpad austenitu, konkrétně počátek, konec a průběh přeměn fází v oceli, ke kterým dochází při ochlazování austenitu (obr. 1). Toto ochlazování je plynulé a probíhá různou rychlostí. V závislosti na rychlosti ochlazování je dosahováno rozdílných struktur. Při pozvolném, pomalém ochlazování dochází k přeměně austenitu na perlit (popřípadě perlit + ferit), který je vzhledem ke svým mechanickým vlastnostem ve většině případů žádoucí. Při rychlejší ochlazení není schopen se všechny austenit transformovat na perlit a dochází k vyloučení jak perlitu, tak bainitu. Při ještě větší rychlosti ochlazování dochází přímo k přeměně austenit → bainit. Při poklesu teploty na teplotu martenzit start (M_S),

pak dochází k martenzitické přeměně a tvorbě martenzitu. S růstem rychlosti ochlazování pak roste i obsah martenzitu ve struktuře oceli. Od jisté rychlosti se pak austenit transformuje přímo na martenzit. Tato rychlost je označována jako rychlost kritická a je označována v_k . Struktura vytvořená ochlazováním podle této křivky je pak tvořena pouze martenzitem. Taková struktura je z hlediska svařování většinou nežádoucí, jelikož se jedná o tvrdou a křehkou strukturu náchylnou k praskání.

Pro oblast svařování je ARA diagram velmi významný, jelikož informuje o možných problémech, které mohou při svařování dané oceli nastat. Zhruba informuje o výsledné struktuře svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti. Nežádoucím strukturám lze předejít předehřevem, který celou křivku ochlazování „posune doprava“. Předehřev lze nahradit například žháním housenky nebo



Obr. 1 ARA diagram [30]



Obr. 2 Modifikovaný ARA diagram [48]

uhlíku zvyšuje pevnost a tvrdost ocelí. Ke tvorbě martenzitu potom dochází při obsahích uhlíku nad 0,25 hm. %. Nejvyšší tvrdost je pak sledována v tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje. A to proto, že je tato oblast rychle ochlazována. Výsledná tvrdost nesouvisí jen s uhlíkem samotným, ale i s procentuálním zastoupením martenzitu ve struktuře (obr. 3).

Teploty, jejichž křivky ohraničují v ARA diagramu martenzitickou přeměnu lze spočítat při známém chemickém složení ocelí dle vzorců:

$$M_s = 539 - 423 \cdot C - 30,4 \cdot Mn - 17,7 \cdot Ni - 12,1 \cdot Cr - 7,5 \cdot Mo \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.4)$$

$$M_f = 346 - 474 \cdot C - 33 \cdot Mn - 17 \cdot Ni - 17 \cdot Cr - 21 \cdot Mo \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.5)$$

Ze vzorců vyplývá, že hodnoty teplot M_s a M_f jsou ovlivněny obsahy uhlíku, manganu, niklu, chromu a molybdenu, přičemž právě uhlík má největší vliv na hodnoty těchto teplot. Dále lze sledovat změnu vlivu molybdenu u teplot M_s a M_f . Zatímco ve vzorci teploty M_s má molybden nejmenší váhu, pro teplotu M_f je jeho váha trojnásobná a jeho vliv je tedy výraznější,

než například vliv chromu nebo niklu. Z toho lze usoudit, že molybden rozšiřuje pásmo martenzitické přeměny a má tedy vliv na výskyt martenzitu v ocelích.

2.3 Studené trhliny

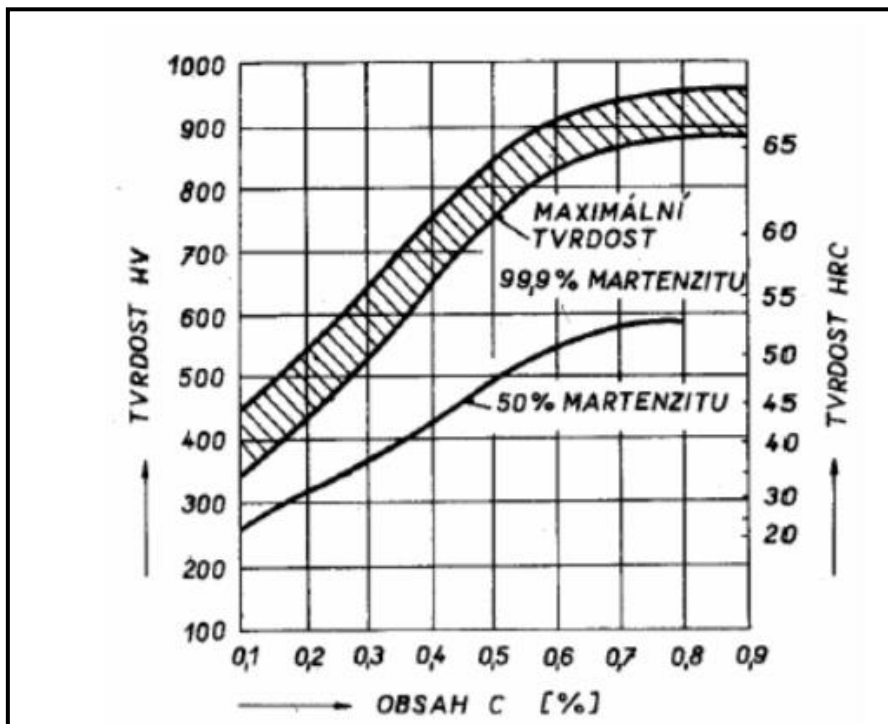
Studené trhliny vznikají při chladnutí oceli a to při teplotách zhruba pod 200°C. Jejich výskyt je evidován především v tepelně ovlivněné oblasti, výjimečně však i ve svarovém kovu. Z hlediska orientace je rozlišujeme na studené trhliny podélné a příčné, které se při chladnutí projevují zvoněním.

Ke vzniku studených trhlín vedou tři základní činitele. Jsou jimi vodík ve svarovém spoji, tvrdé a křehké fáze martenzitu nebo bainitu a zbytková tahová napětí nad mezí pevnosti.

Zdroji a přítomností vodíku se hlouběji zabývá kap. 3.8, která se zabývá vodíkem v ocelích. Praskání a studené trhliny způsobuje konkrétně zbytkový vodík v ocelích. To je vodík, který nestihl difundovat z oceli za zvýšených teplot (do teplot 300 – 200 °C) při svařování. Vodík podporuje několik mechanismů vedoucích k praskání oceli.

Studené trhliny v tepelně ovlivněné oblasti jsou ovlivněny přítomností křehkých a tvrdých struktur jako je martenzit nebo bainit. Výskyt těchto struktur přímo souvisí s ARA diagramem a teplotou $t_{8/5}$ (viz kap. 2.2). Studené trhliny se však mohou vyskytovat i ve svarovém kovu s obsahem feritu, což je výrazně měkkší struktura. Takové trhliny pak vznikají především u vícevrstvých svarů v oblastech krycí housenky.

Praskání za studena ovlivňují významně i zbytková nebo přechodná napětí v oceli. Konkrétně pak napětí tahové neboli kontrakční (obr. 4).



Obr. 3 Závislost mezi tvrdostí a zastoupením martenzitu [48]



Obr. 4 Vliv napětí na vznik studených trhlín [48]

2.4 Teplota předehřevu [77]

Prevenčí před vznikem nežádoucích struktur a tím i před studenými trhlinami může být takzvaný předehřev materiálu. Je to proces, kdy je materiál před samotným svařováním předehříván, čímž se sníží následná rychlost ochlazování. Dojde tedy k nárůstu teploty $t_{8/5}$ a posunutí křivky na ARA diagramu vpravo. Podobné účinky jako předehřev má i dohřev.

Velikost teploty předehřevu závisí na více faktorech, nejvíce však na chemickém složení oceli, které je vyjádřené uhlíkovým ekvivalentem (kap. 2.3). Dalšími faktory jsou očekávaný obsah difuzního vodíku ve svarovém kovu a příkon pro svařování.

Výpočty teplot předehřevu jsou odvozovány ze zkoušek praskavosti. V odborných literaturách se pak lze setkat s nejrůznějšími vzorci pro výpočty parametrů praskavosti, teplot předehřevů a dalších souvisejících veličin.

V praxi se vyskytuje celá řada vzorců pro výpočet potřebné teploty předehřevu. Tyto vzorce zahrnují především vliv chemického složení, velikost uhlíkového ekvivalentu CE nebo tloušťku materiálu. Teplota předehřevu je většinou udávána ve stupních Celsia ($^{\circ}\text{C}$). Pro potřeby praktické části této práce (kap. 4) byla teplota předehřevu počítána dle tzv. Seféniova vzorce:

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{(C_c + 0,005 \cdot s \cdot C_c) - 0,25} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.6)$$

Kde: s ... tloušťka materiálu [mm]
hodnotu C_c vyjádříme dle vzorce:

$$C_c = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (Mn + Cr) + 20 \cdot Ni + 28 \cdot Mo}{360} \quad [\%] \quad (2.7)$$

Předehřev se v praktickém využití aplikuje až od teplot okolo 150°C . Pokud je tedy teoretický hodnota nižší, lze svařovat za pokojových teplot, tzv. za studena. Jedinou podmínkou je, aby okolní teplota přesahovala hranici 5°C . Pokud je teplota okolí nižší, je nutný předehřev vždy.

3 VLIV JEDNOTLIVÝCH PRVKŮ NA VLASTNOSTI A SVAŘITELNOST OCELÍ [48], [19], [81], [36], [43], [60], [29]

Ocel je slitinou železa, uhlíku a dalších prvků. Tyto prvky rozlišujeme na legující, doprovodné a nečistoty (nežádoucí). Takové prvky přicházejí do ocelí různými cestami, z rudy, z paliva (koku) nebo z atmosféry a ovlivňují vlastnosti ocelí, ať už pozitivně či negativně. Vliv těchto prvků závisí především na jejich koncentraci v ocelích. Při nízkých koncentracích určitých prvků můžeme jejich přítomnost zanedbat. Prvky mohou být považovány za doprovodné, pokud nepřekročí dohodnutou hranici (viz Tab.), jinak jsou již považovány za prvky legující. Každá ocel vždy obsahuje pět základních prvků (vyjma železa), jsou to: uhlík, mangan, křemík, fosfor a síra.

Posouzení, zda-li je daný prvek v oceli přínosný nebo škodlivý záleží na konkrétních požadavcích pro danou ocel. Například prvky jako fosfor nebo síra jsou často uváděny jako prvky v ocelích nežádoucí, avšak v některých případech je požadována jejich stanovená koncentrace. Naopak prospěšné prvky jako mangan, chrom nebo hliník mohou být požadovány v co nejnižších koncentracích. To ale platí spíše pro litiny než pro oceli.

Hlavním důvodem legování neboli přidávání různých prvků je dosažení požadovaných vlastností, nejčastěji zvýšení mechanických vlastností jako jsou pevnost a tvrdost současně se zachováním vyhovující houževnatosti. Nejčastějšími legurami jsou prvky jako Mn, Cr, Ni, Si, V, W. Legováním je dále dosahováno zvýšení prokalitelnosti ocelí (za použití Cr, Mn nebo Mo), zmenšení sklonu oceli k růstu zrna (Ti, V), zvýšení odolnosti vůči korozi (Cr, Cr+Ni) a žáru (Cr, V, W) a vysoké odolnosti proti opotřebení (tzv. otěruvzdorné oceli) pomocí Cr, Mo, Mn, W a V.

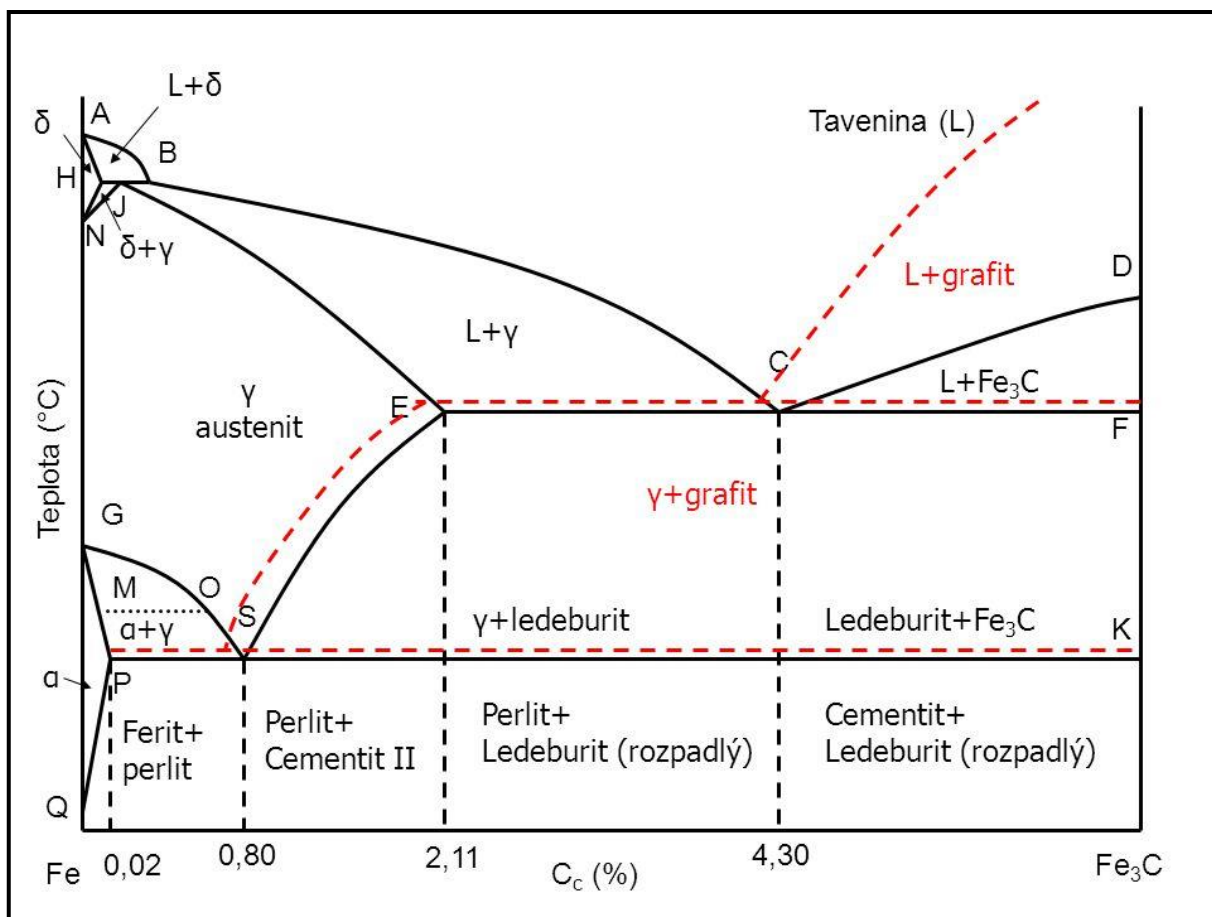
3.1 Uhlík

Uhlík je stěžejním prvkem organické chemie, tedy všech živých organismů. Jeho sloučeniny jsou velmi významné pro energetický průmysl a to jako fosilní paliva, uhlí nebo zemní plyn. V přírodě se vyskytuje nejčastěji ve formě grafitu, který je znám jako běžná tuha, nebo jako diamant. Tyto dvě modifikace se významně liší tvrdostí. Zatímco grafit je velmi měkký, diamant patří podle Mohsovy stupnice tvrdosti mezi nejtvrdší nerosty. Významem uhlíku v ocelích, tedy sloučeninami železa s uhlíkem se zabývá anorganická chemie.

Samotná definice oceli říká, že ocel je slitinou železa, uhlíku a dalších prvků. Je tedy zřejmé, že uhlík je spolu se železem stěžejním prvkem každé z ocelí. Uhlík má zpravidla nejpodstatnější vliv na vlastnosti ocelí. Při odhadování budoucích hodnot oceli lze tedy, ač s určitou nepřesností, vycházet z diagramu Fe-C (obr. 5).

Vzhledem k vlastnostem železa a uhlíku dochází ke vzniku intersticiálních, tedy mezimřížkového, tuhého roztoku. To je takový roztok, kdy je atom uhlíku umístěn do prostoru krystalografické mřížky železa, tedy základního kovu. Dojde-li však ke změně rozpustnosti uhlíku v železe, musí dojít k vylučování uhlíku jako samostatné fáze. V ocelích dochází zpravidla ke tvorbě metastabilní soustavy Fe-Fe₃C. Rozpustnost uhlíku v železe je podmíněna modifikací železa (α nebo γ , liší se krystalickou mřížkou) a teplotou.

Uhlík tvoří spolu se železem několik základních typů intersticiálních roztoků neboli fází. Jsou to: *ferit*, *austenit*, *cementit* a *delta ferit*. Právě výskyt a množství těchto fází v oceli silně ovlivňuje vlastnosti dané ocele. Ferit je měkký a tažný (s tažností A až 70%) a mezi pevností v tahu $R_m = 215$ MPa. Rozpustnost uhlíku ve feritu je minimální. Stejně tak je měkký a tvárný i austenit, avšak rozpustnost uhlíku je v něm podstatně vyšší než ve feritu (při 1147 °C až 2,11% C). Ten se dále vyznačuje značnou houževnatostí a je nemagnetický, čímž je snadno rozlišitelná austenitická ocel. Rozdílná rozpustnost uhlíku ve feritu a austenitu je způsobena rozlišnými krystalovými mřížkami. Austenit má kubickou mřížku plošně středěnou, ferit má mřížku kubickou prostorově středěnou. Cementit je velmi tvrdý a křehký, čímž podstatně zhoršuje obrobitelnost ocelí. S přibývajícím obsahem cementitu dále klesá houževnatost a plastické vlastnosti.



Obr. 5 Diagram železo – uhlík [29]

Uhlík má nejpodstatnější vliv na svařitelnost ocelí. S rostoucím obsahem uhlíku se svařitelnost oceli zhoršuje. Dochází totiž k poklesu plastických vlastností ocelí, dále roste náchylnost k zakalení během svařování a tím ke tvorbě martenzitu nebo bainitu z austenitu. S rostoucím obsahem uhlíku v oceli také roste tvrdost utvářeného martenzitu. To se může projevit tzv. studenými trhlinami, které se projevují nejčastěji v tepelně ovlivněné oblasti (TOO), jen výjimečně je nacházíme ve svarovém kovu. Bez obav z trhlín tedy svařujeme oceli s nízkým obsahem uhlíku, konkrétně: $C \leq 0,22\%$. Takové oceli jsou označovány jako dobře svařitelné, to znamená, že svař mají dobré výsledky i bez zvláštních opatření. Pro určení náchylnosti oceli ke studeným trhlinám slouží uhlíkový ekvivalent C_e

3.2 Mangan

Mangan je obecně považován jako prvek v oceli prospěšný a v konstrukčních ocelích je často přidáván jako legující prvek. Rozpouští se ve feritu a příznivě ovlivňuje vlastnosti, jako jsou houževnatost, pevnost a tvrdost. To vše při zachování plastických vlastností oceli. Zejména zvýšení pevnosti je nepřímo úměrné obsahu uhlíku v oceli. Největšího zvýšení pevnosti se dosahuje u ocelí s obsahem uhlíku do 0,15%. Při obsahu uhlíku v rozsahu 0,7-0,87 % se pevnost za přidání manganu zvyšuje jen nepatrně.

Mangan ovlivňuje tepelné zpracování ocelí. S rostoucí koncentrací manganu v oceli se zpomaluje transformace austenitu v perlitické a bainitické oblasti a zvyšuje prokalitelnost ocelí (křivka ARA diagramu se posouvá vpravo). Austenit se v ocelích stává stabilnějším a při vyšších koncentracích manganu lze pozorovat austenit v ocelích i při pokojové teplotě. Při větších obsazích silně snižuje teplotu martenzit start (M_s).

Další výhodnou vlastností manganu je jeho vysoká afinita ke kyslíku a síře. Díky tomu se používá jako dezoxidační činidlo, tvoří sloučeniny s kyslíkem, ale i se sírou za vzniku sulfidů. Tím příznivě ovlivňuje houževnatost a tranzitní teplotu oceli, ale i její tvařitelnost za červeného

žáru. Za zvýšených teplot podporuje mangan segregaci látek, jako jsou fosfor, olovo, cín, arsen atd.

Mangan je často využíván jako legující prvek právě konstrukčních ocelí a to především s kombinací dalších prvků. U konstrukčních ocelí se nejčastěji vyskytuje v koncentracích do 2% objemu. Je levný a snadno dostupný.

3.3 Křemík

Křemík je dalším legujícím a tedy žádoucím prvkem v ocelích. Zvyšuje mez kluzu a pevnost. V koncentracích nad 1% potlačuje plastické vlastnosti feritu, v němž se rozpouští. V ocelích tedy netvoří karbidy. Má silné dezoxidační účinky díky své vysoké afinitě ke kyslíku. Proto je někdy užíván jako dezoxidační přísada (do 0,5%) a ne jako legura. Stejně jako například mangan podporuje segregaci prvků, jako jsou fosfor nebo olovo. Další jeho vlastností je zvyšování odolnosti oceli proti popouštění. Zvyšuje žáruvzdornost, ve větších koncentracích však podporuje náchylnost ke vzniku křehkého lomu.

3.4 Ostatní legury

Jak již bylo zmíněno, legury jsou do ocelí přidávány z důvodu zvýšení mechanických vlastností. Mimo to ale také ovlivňují fázové přeměny v oceli, což je pozorovatelné na ARA nebo IRA diagramech ocelí, kde mají velký vliv na polohu a tvar křivek rozpadu austenitu.

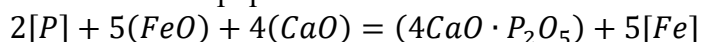
Ve většině případů zvyšují stabilitu austenitu, čímž je zpomalen jeho rozpad. Výjimku tvoří z legujících prvků jen kobalt a hliník. To se projevuje posunutím rozpadových křivek směrem vpravo k vyšším časům a delšími rozpadovými dobami. Legury, které jsou rozpustné v tuhém roztoku, jako jsou Ni nebo Cu neovlivňují tvar diagramu, pouze jeho posunutí. Naopak karbidotvorné přísady jako jsou například Cr, W, V nebo Mo zapříčiňují výraznou i změnu diagramu, jelikož oddalují oblast bainitickou a perlitickou.

Tyto prvky jen zanedbatelně ovlivňují vznik martenzitu, konkrétně teplotu M_s . Většinou ji nepatrně snižují. K jejímu silnému snížení dojde za přítomnosti větších obsahů již zmíněného manganu nebo niklu.

3.5 Fosfor

Fosfor spadá mezi základní prvky ocelí a má tedy vliv na vlastnosti všech typů ocelí. Význam jeho vlivu se odvíjí od jeho obsahu v materiálu. V závislosti na obsahu uhlíku v oceli fosfor zvyšuje pevnost a tvrdost, stejně tak i odolnost proti atmosférické korozi. Je-li obsah uhlíku nízký (do 0,01%), pak fosfor způsobuje zvýšení tažnosti. Avšak je-li obsah uhlíku vyšší (od 0,05%), zvyšuje se křehkost feritu právě v důsledku výskytu fosforu. Vliv fosforu na křehkost je značný již od 0,05 % P. S jeho rostoucí koncentrací se zvedá také jeho přechodová teplota. Při koncentraci 0,12% P jsou oceli křehké i při pokojové teplotě. Fosfor zapříčiňuje vznik trhlin a prasklin vedoucí ke křehkým lomům, zejména za studena. Ty jsou prokazatelné snížením vrubové houževnatosti. Zároveň snižuje mez únavy.

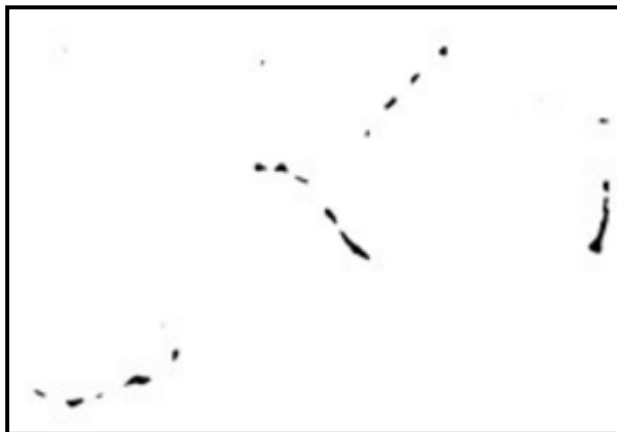
Fosfor se v ocelích rozpouští ve feritu a tvoří sloučeniny. Vzhledem k jeho nepříznivým účinkům na ocel je odstraňován pomocí tzv. odfosfoření. Jedná se děj probíhající na rozhraní mezi taveninou a struskou, kdy je fosfor P navázán pomocí oxidu železitého FeO za vzniku železa Fe a oxidu fosforečného P_2O_5 . Tato reakce je však zvrtná a mohlo by dojít ke zpětné redukci oxidu železem. Proto se vzniklý oxid musí stabilizovat oxidem vápenatým CaO. Celkově lze celý proces odfosfoření popsat rovnicí:



Výsledek odfosfoření je závislý na přítomnosti a obsahu dalších prvků v oceli. Prvky zvyšující aktivitu fosforu jako jsou uhlík, měď nebo dusík napomáhají odfosfoření oceli. Naopak prvky používané jako legující aktivitu fosforu často snižují a tím zhoršují odfosfoření. Jsou molybden, tantal, niob, mangan a chrom, přičemž právě dva poslední jmenované jsou nejdůležitější, jelikož se mohou v ocelích vyskytovat ve značeném množství. Proto jsou tyto prvky přidávány až po odfosfoření. Fosfor nepříznivě ovlivňuje svařitelnost ocelí.

3.6 Síra

Výskyt síry hraje významnou roli ve všech typech ocelí. Síra je zpravidla prvkem v oceli nežádoucím. Rozpustnost síry v železe je velmi malá a proto se po obohacení mezidendritických prostor sírou vylučuje jako sulfidické vměstky. Tyto vměstky výrazně snižují houževnatost ocelí a zvyšují tranzitní teplotu. Oceli obsahující sulfidy železa na hranicích zrn mají malou pevnost a tažnost až do teploty 1200 °C. Tento sulfid v oceli dále nepříznivě ovlivňuje náchylnost na vznik teplých trhlin, tím zhoršuje svařitelnost i tváření za tepla. Při vysokém podílu dezoxidovadel v oceli dochází ke vzniku vměstků, které kromě snížení houževnatosti a zhoršení kvality povrchu vedou i ke snížení meze únavy. Kromě zhoršení svařitelnosti síra způsobuje i zhoršení schopnosti k cementování oceli a sníženou korozní odolnost ocelí.



Obr. 6 Sulfidické vměstky II. typu [81]

Síru lze se sulfidů železa vyvázat pomocí prvků, které mají vyšší afinitu k síře, než železo. Může být použit mangan za vzniku sulfidu manganatého MnS, jenž nemá tak nepříznivý vliv jako FeS. Tento sulfid má navíc podstatně vyšší teplotu tavení (1600°C) než ocel. Sulfidy manganu jsou tedy při tuhnutí oceli již v pevném stavu. Stávají se z nich krystalizační zárodky a nevyskytují se na hranicích zrn. Dále může být použito prvků jako Ca, Mg nebo kovů vzácných zemin. Dochází k tvorbě sulfidů, jenž mají nízkou teplotu tavení. Ty tvoří kulovité vměstky, které způsobují vyšší houževnatost ocelí, než vměstky jiných typů (např. MnS).



Obr. 7 Sulfidické vměstky IV. typu [81]

Nekovové vměstky jsou v ocelích rozdělovány do čtyř základních typů dle klasifikace sestavené Simsem a Dahlem. Síra tvoří II., III. a IV. typ vměstků na základě vlivu kyslíku, množství uhlíku a množství a druhů dezoxidovadel (obr. 6, obr. 7). Z hlediska houževnatosti jsou pro konstrukční oceli nejprůpustnější vměstky II. typu.

Příznivě však síra působí na obrobiteľnosť ocelí. Proto je do konstrukčních ocelí někdy úmyslně přidávána (např. automatová ocel). Příznivě ovlivňuje také třecí vlastnosti ocelí. Zlepšené obrobiteľnosti se u ocelí dosahuje až několika desetinami procenta síry. Síra v běžně vyráběných ocelích se však pohybuje pod hranicí 0,20%.

Optimálního obsahu síry v ocelích se dosahuje odsířením. Podobně jako odfosfoření probíhá i tento proces na rozhraní mezi struskou a kovem. Stejně tak je důležitá přítomnost prvků zvětšujících aktivitu síry, jako jsou Al, W, Si. Naopak legury často aktivitu síry snižují, např. Cu, Mn, Cr. U vysoce legovaných ocelí mohou být obsahy legur tak vysoké, že zcela zabrání odsíření.

3.7 Kyslík

Kyslík je důležitým prvkem při výrobě ocelí. Je do nich schválně přiváděn, aby docházelo k odstranění nebo alespoň redukování nežádoucích prvků jako jsou fosfor, vodík či dusík pomocí tzv. oxidace. Kyslík je dále využíván k oxidaci uhlíku.

Tento děj se nazývá uhlíkový var. Jedná se o velmi důležitý děj při výrobě ocelí. Vznikají bubliny oxidu uhelnatého CO, které probublávají taveninou a dochází k jejímu promíchání. Tím se dosahuje homogenity po teplotní i chemické stránce. Současně jsou odbourávány nežádoucí prvky a je redukován obsah uhlíku v oceli.

Kyslík má v ocelích při teplotě 1600°C rozpustnost přibližně 0,21%, v hotových ocelích se jeho maximální obsah uvádí 0,005%. Obsah kyslíku je omezen přítomností dalších prvků v oceli. Podle množství kyslíku jsou rozlišovány oceli uklidněné (zbavené kyslíku) a neuklidněné. Přebytkový kyslík je z ocelí odstraňován tzv. dezoxidací. Je to děj, kdy je kyslík vázán prvky se silnou afinitou ke kyslíku. Takové prvky se nazývají dezoxidovadla. Nejčastějšími dezoxidovadly jsou hliník a křemík. Dochází k tzv. srážecí dezoxidaci, kdy vznikají pevné nebo kapalné oxidy, které vyplouvají do strusky. Nejmenší oxidy však zůstávají v oceli a vytváří se (podobně jako u síry) oxidické vměstky. Ty nepříznivě ovlivňují vlastnosti ocelí, zhoršují mikročistotu a mohou způsobit zkřehnutí oceli (stárnutí), což je problém především neuklidněných ocelí.

3.8 Dusík

Dusík je prvkem vyskytující se ve slitinách železa vždy. Obecně je považován za nežádoucí prvek. Jeho množství je závislé na technologii výroby. Stejně jako u uhlíku se jedná o austenitotvorný prvek. Z toho důvodu je využíván jak legury pro austenitické korozivzdorné oceli. Největší rozpustnosti dosahuje při 1600°C a to 0,04%. V praxi se však setkáváme s obsahy pod 0,012%. S železem vytváří intersticiální tuhý roztok a způsobuje zpevnění matrice.

Dusík tvoří stabilní nitridy spolu s hliníkem, titanem a zirkonem. Nitridy zhoršují materiálové vlastnosti, jako jsou tažnost nebo vrubová houževnatost. Naopak zvyšují mez kluzu, pevnost a tvrdost. K vylučování nitridů dochází převážně na hranicích austenitických zrn. V praxi je vylučování nitridů nebezpečné v tepelně ovlivněných oblastech svarů a u ocelí pracujících při teplotách 100 až 350 °C. Dochází zde ke stárnutí a zvýšení křehkosti. V okolí svarů může při poklesu teplot dokonce dojít rozrušení konstrukce. Využívá se eliminace dusíku právě Al, Ti nebo Zr.

3.9 Vodík

Vodík je příměsí nežádoucí. Do ocelí vniká rozkladem vzdušné vlhkosti při tavbě (při výrobě nebo svařování). Maximální rozpustnosti dosahuje při 1600°C a to 0,0024 %. Obvykle se však vyskytuje v koncentracích přibližně pětkrát menších. Vodík se vyznačuje nejvyšší difúzní rychlostí v ocelích a dokáže difundovat i při pokojové teplotě.

Vodík zhoršuje plastické vlastnosti ocelí (především houževnatost), avšak nezvyšuje pevnost. Jeho důležitou vlastností je náhlá změna rozpustnosti při fázové změně železa $\gamma \rightarrow \alpha$. Za zvýšených teplot (200 až 400°C) způsobuje takto vyloučený vodík prnutí, které může vést až k poruše materiálu. Vznikají trhlinky, takovéto zkřehnutí je označováno jako vločkovitost. Ta je typická především pro pevné a vysoce pevné oceli. Obsah vodíku v ocelích lze snadno snížit ohřevem na teploty 200 až 600°C.

Při svařování má vodík veliký vliv na svarový kov. Způsobuje oduhličování a vznik pórů ve svarovém kovu. Dále dochází ke tvorbě trhlin v tepelně ovlivněné oblasti i ve svarovém kovu. Zdroje vodíku při svařování jsou zejména vlhkost (obal elektrod, tavidla, povrch základního a přídavného materiálu), vodík absorbovaný mořením či poměďováním povrchů drátů, vlhkost ochranných plynů atd.

4 VYHODNOCENÍ KONSTRUKČNÍCH OCELÍ [48], [4], [50], [45], [40], [36]

Následující kapitola se zabývá vyhodnocením konkrétních vzorků ocelí. A to konstrukčních ocelí S355, S275 a S235. Byly vyhodnocovány mechanické vlastnosti, jako jsou mez pevnosti nebo mez kluzu, dále bylo přihlíženo k chemickému složení příslušných vzorků. Následně byly počítány hodnoty uhlíkových ekvivalentů CE a CET, teploty přehřevu T_p nebo teploty M_s a M_f . Tyto hodnoty byly počítány dle vzorců (2.4), (2.5) a (2.6), uvedených v kapitolách (2.2) a (2.4). Dále bylo prováděno porovnání s příslušnou normou.

Pro snadnější orientaci ve zpracovávaných datech byly vybrané hodnoty vyhodnocovány graficky formou bodových grafů. Jednalo se o grafy znázorňující obsahy jednotlivých prvků v ocelích. Tyto grafy byly ve většině případů ohraničené maximálními přípustnými obsahy jednotlivých prvků. Znázorňovaly tedy i to, zda-li se prvky blíží svému maximálnímu povolenému obsahu nebo zda-li se vyskytují pouze ve stopových množstvích. Dále pak znázorňovaly závislosti mezi chemickým složením a na něm závislými charakteristikami ocelí. Z průběhů a podob těchto grafů byly poté vyvozovány závěry.

4.1 Ocel S355 [70], [58], [15], [80], [24], [13], [12], [63], [7], [32], [79], [22], [20], [11], [82], [37], [33], [66], [47], [68], [9], [34], [64], [65], [71], [17], [55], [41]

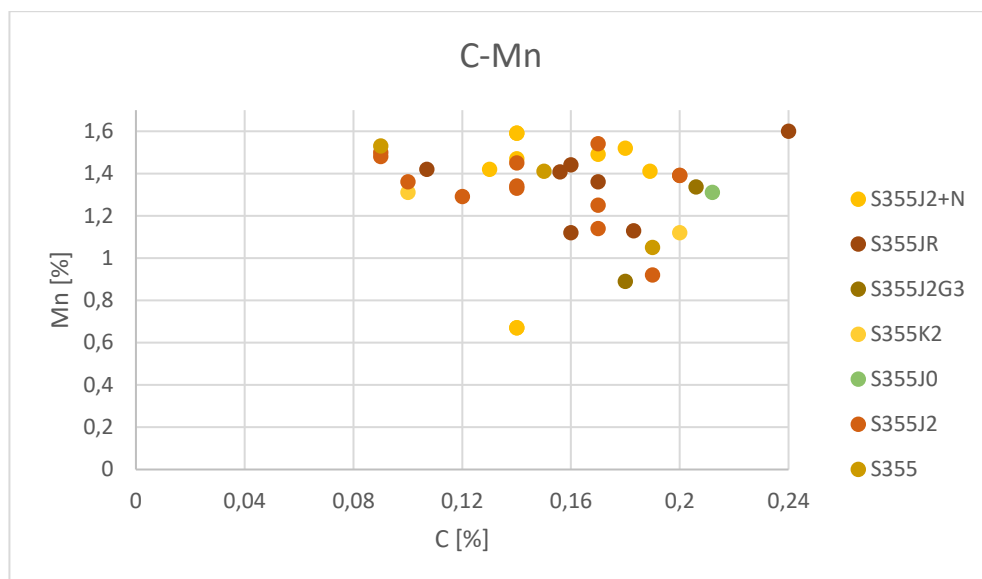
Oceli S355 jsou řazeny mezi konstrukční jemnozrnné oceli. Jsou označovány jako oceli svařitelné. Je však důležité dbát na riziko studených trhlin, které se zvyšuje s rostoucí tloušťkou materiálu a s rostoucí hodnotou uhlíkového ekvivalentu. Tyto oceli mohou být využity i pro tváření za tepla i za studena. Při obrábění může způsobit podstatně velká tažnost problémy s lámáním třísky. V praxi se tyto oceli využívají například pro stavební svařované konstrukce nebo mosty.

Pro ocel S355 bylo vyhodnoceno celkem 39 vzorků, které se sestávali z konstrukčních ocelí typu S355JR, S355J2, S355J2+N atd. (viz Příloha 1). Při vyhodnocování ocelí byl kladen důraz na vyhodnocení mechanických vlastností, chemického složení a z něj vyplývajících veličin, jako je teplota přehřevu nebo uhlíkové ekvivalenty CE a CET. Tyto hodnoty byly následně shrnuty a porovnány s příslušnou normou EN 10025.

4.1.1 Chemické složení ocelí S355

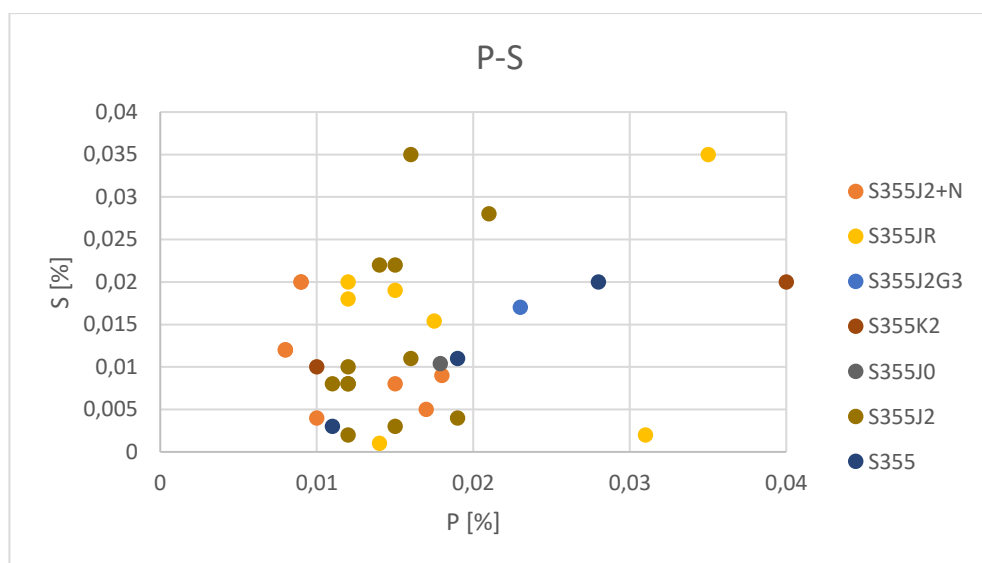
Chemické složení ocelí S355 bylo vyhodnocováno dle údajů v atestech, člancích nebo ARA diagramech. Ne vždy však byly uvedeny obsahy všech vyhodnocovaných prvků (viz Příloha 1), a tak nejsou veškeré grafy kompletní. Grafické vyjádření se vztahuje především na obsahy základních prvků v oceli, jako jsou uhlík, křemík, mangan, fosfor, síra, dále pak na nikl, chrom, měď a vanad.

Poloha bodů v grafu (graf 1), které vyjadřují zastoupení uhlíku a manganu značí maximální dovolené zastoupení těchto prvků v oceli. To platí především pro mangan. Ovšem i co se obsahu uhlíku týká, drtivá většina vzorků se pohybuje v horní polovině dovoleného obsahu.



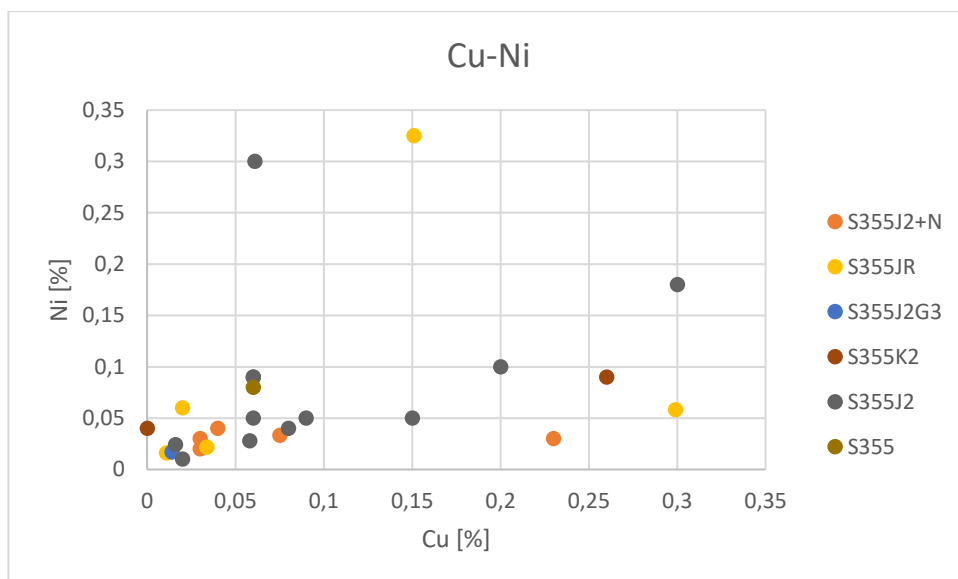
Graf 1 Obsahy C a Mn v ocelích S355

Naopak tomu je v případě obsahu fosforu a síry (graf 2). Zde je naopak snaha o minimální zastoupení těchto prvků, zejména pak pro síru. To je způsobeno nepříznivými vlivy těchto prvků na vlastnosti ocelí (kap. 3.5, kap. 3.6).



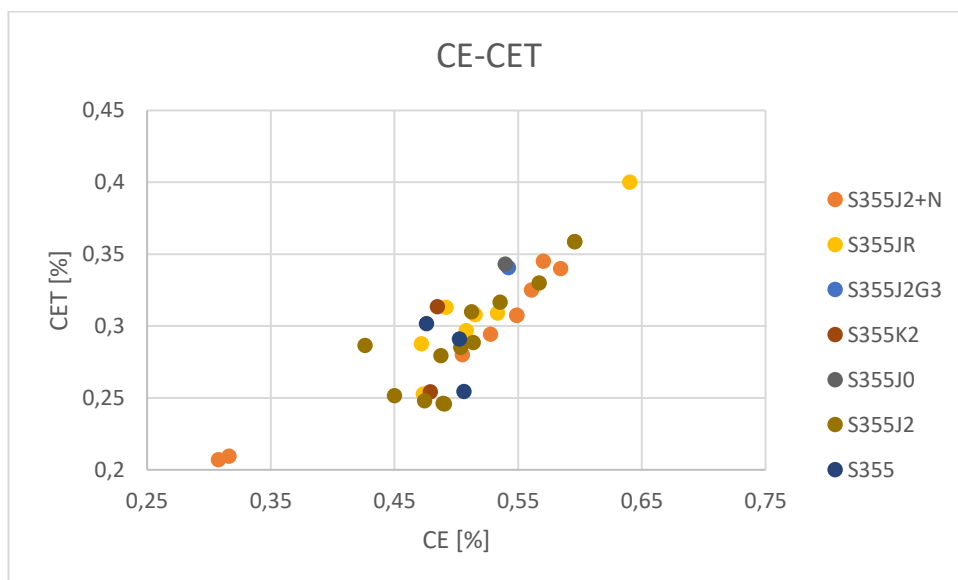
Graf 2 Obsahy P a S v ocelích S355

Podobně je tomu například i u mědi a niklu (graf 3), kde jsou hodnoty většinou soustředěny do 0,1 % obsahu.



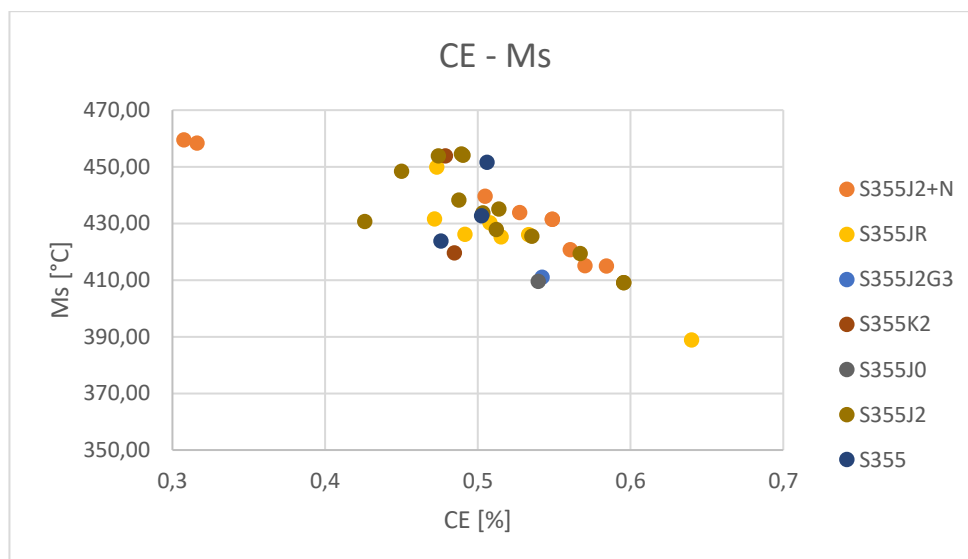
Graf 3 Obsahy Cu a Ni v ocelích S355

Aby byl zahrnut vliv celého chemického složení a ne jen vybraných prvků, byly pro oceli S355 spočítány a graficky vyhodnoceny (graf 4) hodnoty uhlíkových ekvivalentů CE a CET (kap. 2.1). Z grafu je možné vypočítat značný rozptyl hodnot uhlíkových ekvivalentů, zejména pak pro hodnoty CE. Zajímavé je, že zatímco u ocelí S355J2 tvoří hodnoty CE i CET ustálenou skupinu s rozptylem do 0,15 pro CE a 0,11 pro CET, u ocelí S355J1+N je možné pozorovat rozptyly téměř dvojnásobné.



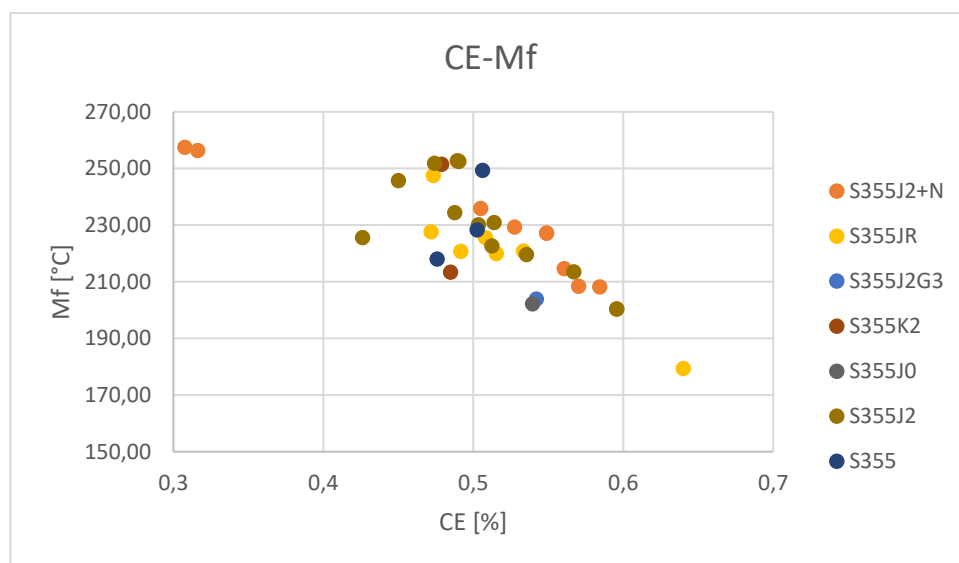
Graf 4 Vykreslení hodnot CE a CET ocelí S355

Tyto hodnoty byly následně zkoumány a vyhodnocovány v závislosti na dalších charakteristikách oceli.



Graf 5 Závislost teploty M_s na CE pro oceli S355

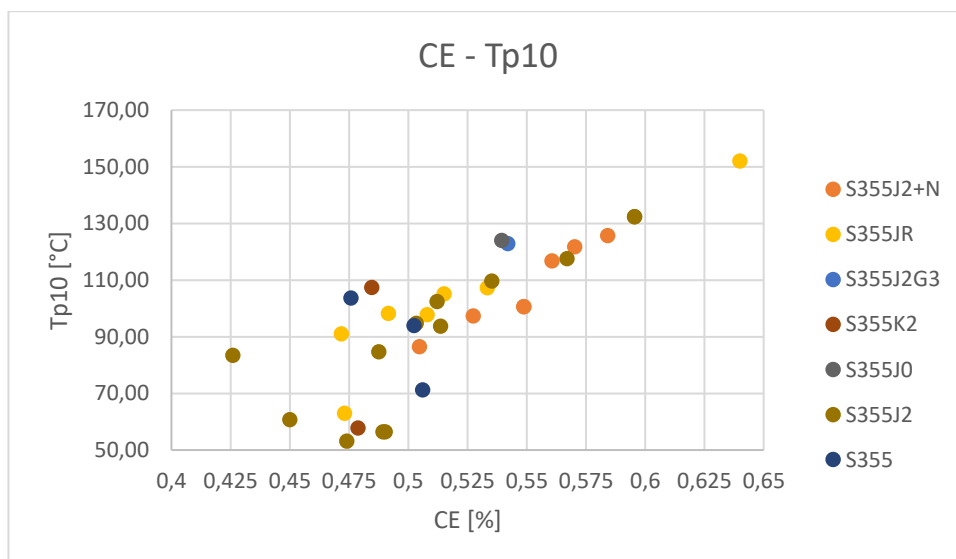
Na grafu (graf 5) je znázorněna závislost mezi hodnotami CE a teploty martenzit start. Z grafu vyplývá, že lze obecně říci, že s rostoucí hodnotou CE klesá teplota M_s . Platí tedy nepřímá úměra mezi těmito dvěma charakteristikami. Na grafu lze také pozorovat rozptyl teploty M_s , který těsně přesahuje hodnotu 70 °C.



Graf 6 Závislost teploty M_f na CE pro oceli S355

Obdobná závislost platí i pro teplotu martenzit finish M_f (graf 6), jejíž rozptyl dosahuje téměř 80 °C. Tyto rozdíly teplot jsou zapříčiněny rozdílným chemickým složením oceli, na kterém jsou tyto parametry závislé. Nelze však vyloučit ani chybné měření obsahů jednotlivých prvků.

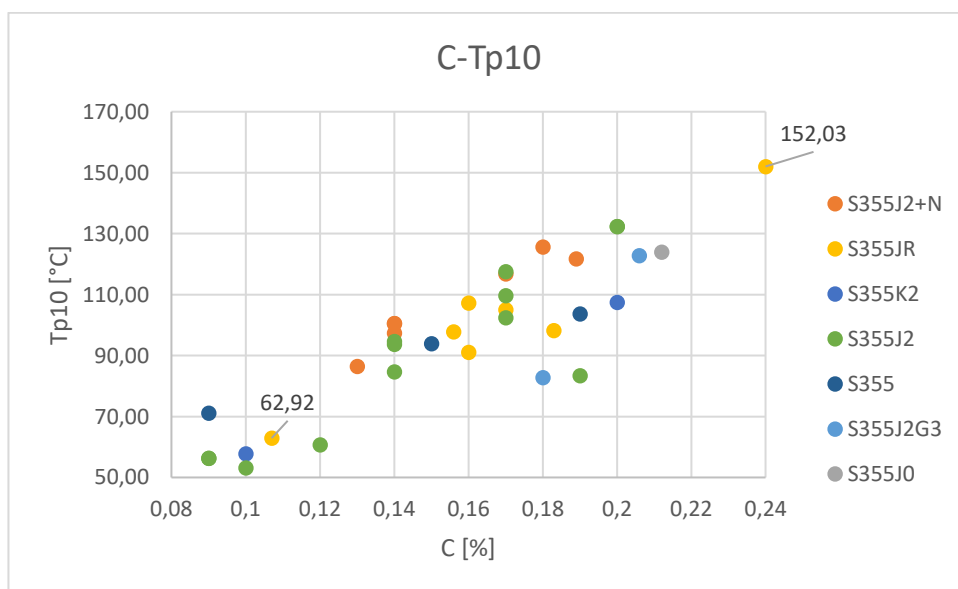
Další zkoumanou charakteristikou byla závislost chemického složení zastoupená hodnotami CE na teplotě předehřevu (graf 7). Při výpočtu teploty předehřevu bylo postupováno dle Seféniova vzorce (kap. 2.4), kde hraje svoji roli tloušťka materiálu. Aby nebylo vyhodnocení zatíženo tímto faktorem, byla spočítána teplota předehřevu všech materiálů pro konstantní tloušťku. Pro naše účely byla zvolena tloušťka $s = 10$ mm, teplota předehřevu pak byla označována jako T_{p10} .



Graf 7 Závislost teploty předehřevu T_{p10} na CE pro oceli S355

Z grafu na první pohled vyplývá, že mezi hodnotou CE a teplotou předehřevu panuje přímá úměra. Se zvyšující se hodnotou uhlíkového ekvivalentu se tedy zvyšuje i teplota předehřevu. Je nutné poznamenat, že dle Sefénoiova vzorce nebylo možné vypočítat hodnotu T_{p10} pro všechny oceli. Jak lze vyčíst z grafu, minimální hodnota CE pro výpočet T_{p10} byla za hranicí 0,425 %.

Dále si lze všimnout velkého rozptylu hodnot T_{p10} , který se blíží ke 100 °C. Jelikož byly teploty počítány pro totožnou tloušťku materiálu, lze tento faktor zanedbat. Za velkým rozptylem tedy stojí chemické složení oceli, konkrétně pak uhlík, mangan, chrom, nikl a molybden. Jelikož význam uhlíku je ve vzorci nejmarkantnější, byla sledována závislost této teploty i na hodnotách obsahů uhlíku v oceli (graf 8).

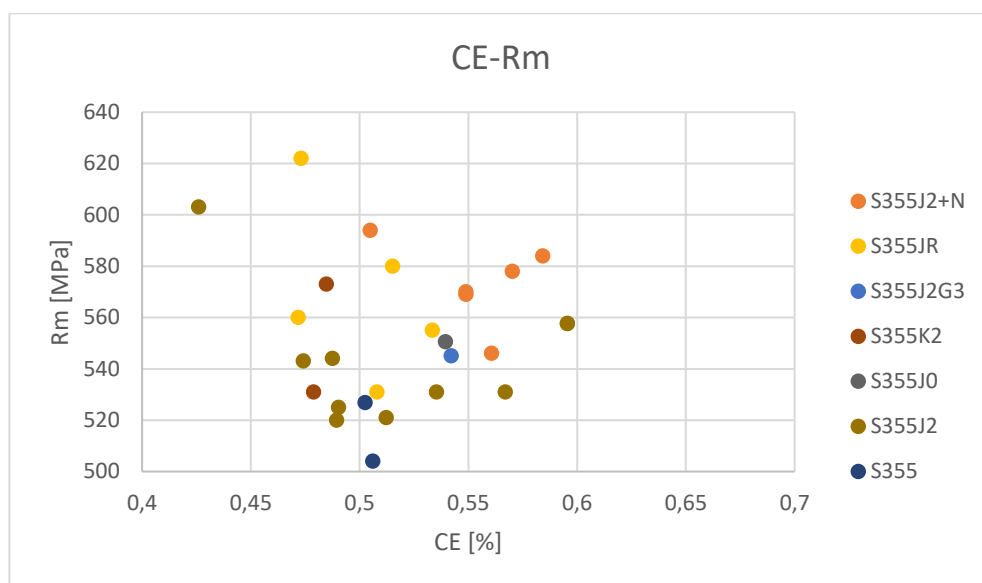


Graf 8 Závislost teploty předehřevu T_{p10} na obsahu uhlíku pro oceli S355

Z tohoto grafu je lineární závislost mezi hodnotami obsahů uhlíku a teplotou předehřevu ještě markantnější. Závislost lze čitelně sledovat na případě oceli S355JR. V levém dolním rohu lze sledovat vzorek s obsahem uhlíku 0,107% a T_{p10} odpovídající zhruba 63 °C, naopak v levém horním rohu se nachází vzorek s obsahem C 0,24% a $T_{p10} = 152$ °C.

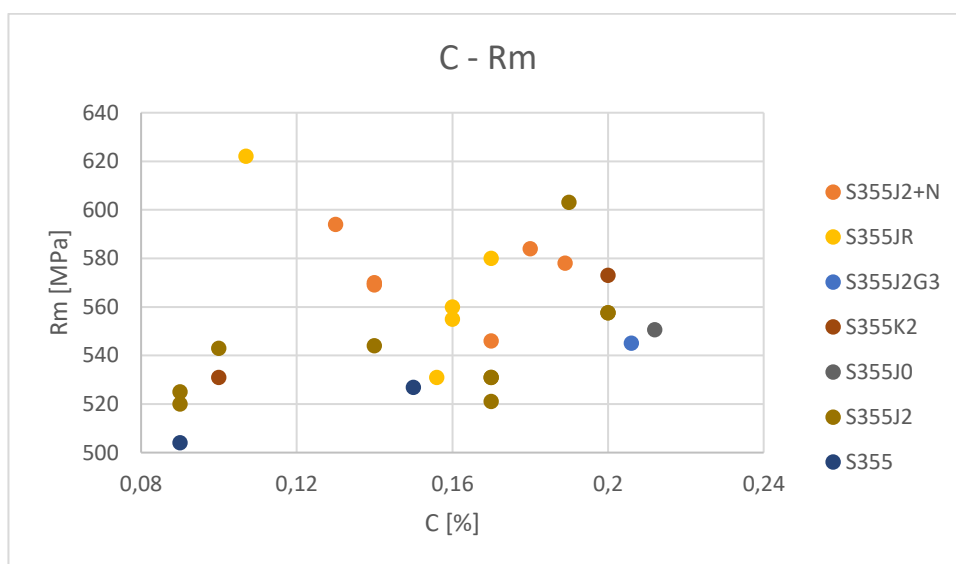
4.1.2 Mechanické vlastnosti ocelí S355

Z mechanických vlastností ocelí S355 byly zkoumány mez kluzu, mez pevnosti a tažnost ocelí. Tyto vlastnosti byli následně graficky vyhodnocovány v závislosti například na obsahu uhlíku a manganu v oceli nebo na hodnotě uhlíkového ekvivalentu CE.



Graf 9 Závislost Rm na CE ocelí S355

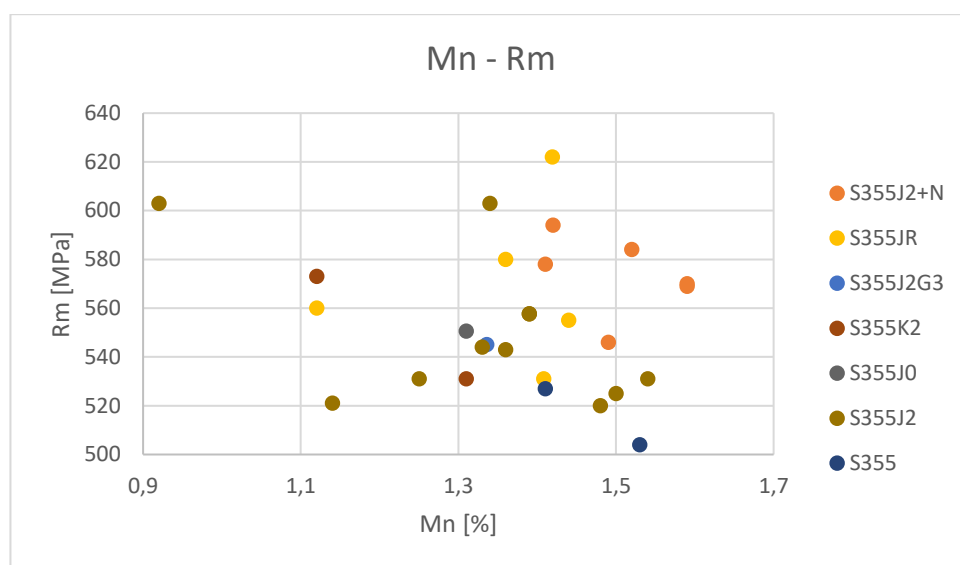
Z grafu (graf 9) nelze jednoznačně určit obecnou závislost mezi uhlíkovým ekvivalentem CE a mezí pevnosti oceli. Dalo by se však říci, že pro většinu typů ocelí roste hodnota R_m s hodnotou CE. S tím souvisí i závislost obsahu uhlíku na velikosti meze pevnosti (graf 10). Zde platí podobná charakteristika jako pro graf předešlý. A tedy, že ve většině případů s rostoucí hodnotou C v oceli roste i hodnota meze pevnosti.



Graf 10 Závislost Rm na obsahu C v ocelích S355

Dále byla zaměřena pozornost na závislost mezi obsahem manganu v oceli a hodnotami meze pevnosti (graf 11), jelikož mangan má vliv na pevnost.

Zde však nebyl zaznamenán náznak alespoň nějaké obecné závislosti. Z grafu je například patrné, že jeden ze vzorku oceli S355J2 má nejnížší obsah manganu, přitom má druhou nejvyšší pevnost.



Graf 11 Závislost Rm na obsahu Mn v ocelích S355

4.1.3 Diskuse výsledků ocelí S355

Následující kapitola vyhodnocuje zkoumaná data a shrnuje výsledky pro oceli S355. Výsledky jsou rozčleněny do tří sekcí a to na vyhodnocení chemického složení, závislých charakteristik a mechanických vlastností. Pro všechny vyhodnocované veličiny byla určena minimální a maximální hodnota, dále pak byl počítán průměr, medián a rozpětí statistického souboru, značené v tabulkách písmenem R.

Tab. 14 Vyhodnocení chemického složení ocelí S355.

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]
Norma	<i>max 0,24</i>	<i>max 0,6</i>	<i>max 1,7</i>	<i>max 0,04</i>	<i>max 0,04</i>		
MIN	0,09	0,013	0,67	0,008	0,001	0,01	0
MAX	0,29	0,89	1,6	0,04	0,035	0,14	0,12
PRŮMĚR	0,160	0,298	1,320	0,016	0,013	0,0546	0,020
MEDIÁN	0,16	0,31	1,39	0,015	0,011	0,05	0,01
R	0,2	0,877	0,93	0,032	0,034	0,13	0,12

Jak je z tabulky (tab. 14) zřejmé, ne vždy bylo dosaženo hodnot stanovených normami. V tomto případě můžeme například pozorovat obsah uhlíku v oceli vyšší o 0,05 %, než je dovoleno normou. Stejně tak obsah křemíku je překročen o téměř 0,3 %. K těmto odchylkám od normy však docházelo zcela výjimečně a konkrétně v těchto dvou případech se jednalo a tentýž vzorek oceli (viz Příloha 1). I tyto vzorky však byly do vyhodnocení zařazeny, jelikož právě tyto vzorky mohou způsobovat komplikace při výrobě a je třeba s nimi v obecném zhodnocení počítat. Mimo základních prvků ocelí jsou vyhodnocovány i Cr a Mo, které mají vliv na vlastnosti i svařitelnost ocelí.

Tab. 15 Vyhodnocení charakteristik závislých na chemickém složení ocelí S355.

	CE [%]	CET [%]	Ms [°C]	Mf [°C]	Tp10 [°C]
MIN	0,31	0,200	417,24	210,07	53,16
MAX	0,544	0,323	464,46	263,16	175,79
PRŮMĚR	0,419	0,264	440,17	236,19	99,44
MEDIÁN	0,422	0,270	438,28	234,06	99,38
R	0,234	0,123	47,22	53,09	122,62

Z hodnot tabulky (tab. 15) lze vyčíst, že průměrná velikost uhlíkového ekvivalentu CE se pohybovala těsně pod hranicí 0,42 %. Výše uvedená tabulka (Tab. 15), zase uvádí průměrný obsah uhlíku v těchto ocelích 0,16%. Tyto hodnoty svědčí o zaručené svařitelnosti bez nutnosti teploty předehřevu (kap. 2.1). O tom svědčí i hodnoty teploty předehřevu T_{p10} . Zde se maximální hodnota dostala sice až nad hodnotu 175 °C, která by značila nutnost předehřevu. Jednalo se ovšem o extrém, průměrné teploty předehřevu se pohybovaly pod hranicí 100 °C, což svědčí o zbytečnosti předehřevu. Jak bylo totiž výše zmíněno (kap. 2.4), předehřev se v praxi používá až od teplot T_p nad 150 °C.

Tab. 16 Vyhodnocení mechanických vlastností ocelí S355.

	Reh (Rp0,2) [MPa]	Rm [MPa]	A [%]
Norma	<i>min 345</i>	<i>min 470</i>	<i>min 22</i>
MIN	322	504	23,7
MAX	531	622	41
PRŮMĚR	391,679	555,025	30,625
MEDIÁN	376,8	552,8	30
R	209	118	17,3

Mechanické vlastnosti ocelí S355 shrnuje tabulka (tab. 16). Na rozdíl od meze pevnosti, kdy podmínky kladené normou splňovaly všechny vzorky, u meze kluzu se vyskytl vzorek, který svou hodnotou $R_{p0,2}$ nesplňoval požadované minimum. To mohlo být zapříčiněno například nedostatečným množstvím prvků podporující tyto mechanické vlastnosti, jako jsou například uhlík, mangan nebo křemík.

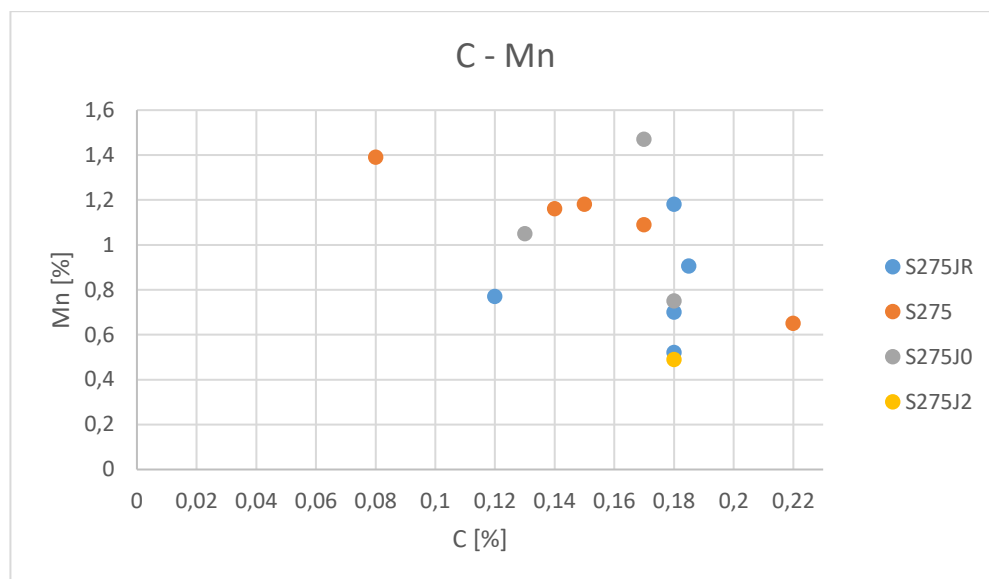
4.2 Ocel S275 [62], [14], [16], [26], [25], [5], [67], [38], [49], [6], [57], [53], [76]

Oceli S275 spadají do kategorie nelegovaných svařitelných ocelí. Z hlediska vlastností i chemického složení se nacházejí mezi ocelmi S355 a S235. Stejně jako ocele S355 může být i tento typ ocelí použit pro svařované konstrukce (například mostů nebo hal).

Pro ocel S275 bylo celkem vyhodnocováno celkem 14 vzorků zastoupených typy S275JR, S275J0, S275J0 a dále blíže nespecifikovanými ocelmi S275 (viz Příloha 2). Vyhodnocování bylo tentokrát zaměřeno spíše na chemické složení a jeho vliv na teplotu předehřevu a teploty týkající se vzniku martenzitu. Pro detailní vyhodnocování mechanických vlastností nebylo dohledáno dostačující množství podkladů.

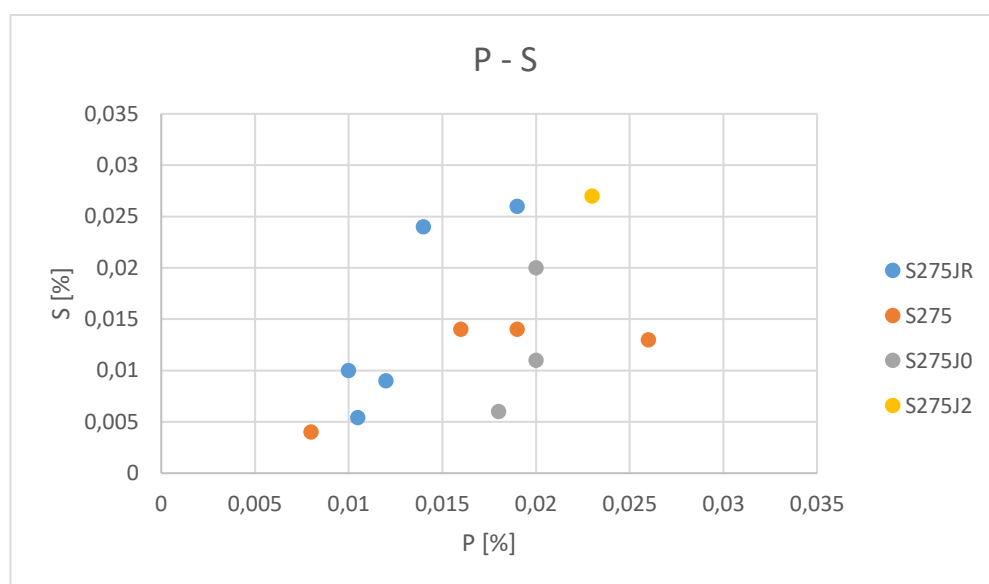
4.2.1 Chemické složení ocelí S275

Při vyhodnocování chemického složení ocelí S275 byl opět kladen důraz na zastoupení základních prvků v ocelích, konkrétně uhlíku, manganu, fosforu, síry, křemíku a dále pak hliníku.



Graf 12 Obsahy C a Mn v ocelích S275

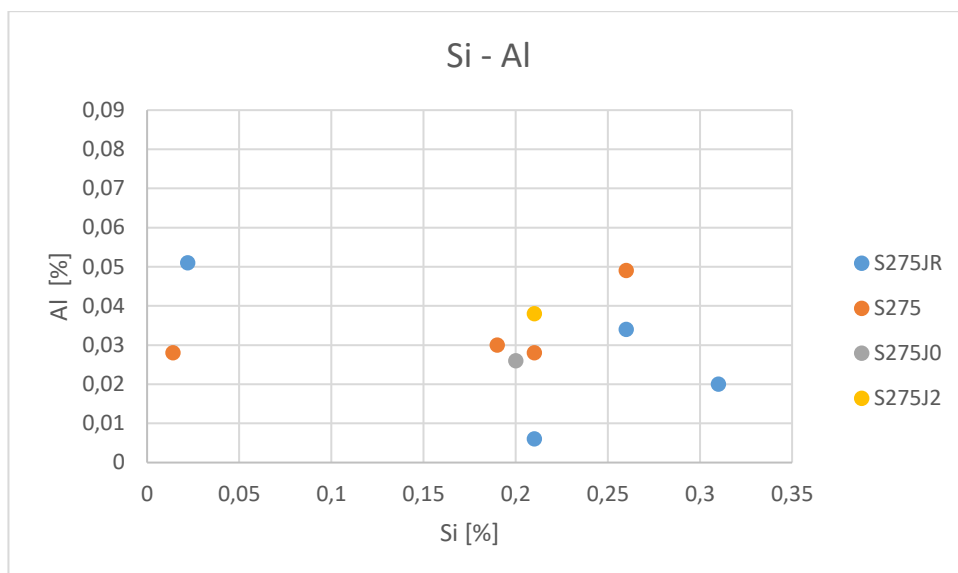
Z grafu (graf 12) lze pozorovat obsahy uhlíku a manganu. Ani v jednom případě se nestalo, že by byl obsah těchto prvků obsahem hraničním. Naopak například u oceli S275JR lze vidět, že se všechny vzorky, až na jednu výjimku, se koncentrují kolem obsahu 0,18 % C. Naopak značně chaoticky působí zastoupení prvků v blíže nespecifikovaných ocelích S275.



Graf 13 Obsahy P a S v ocelích S275

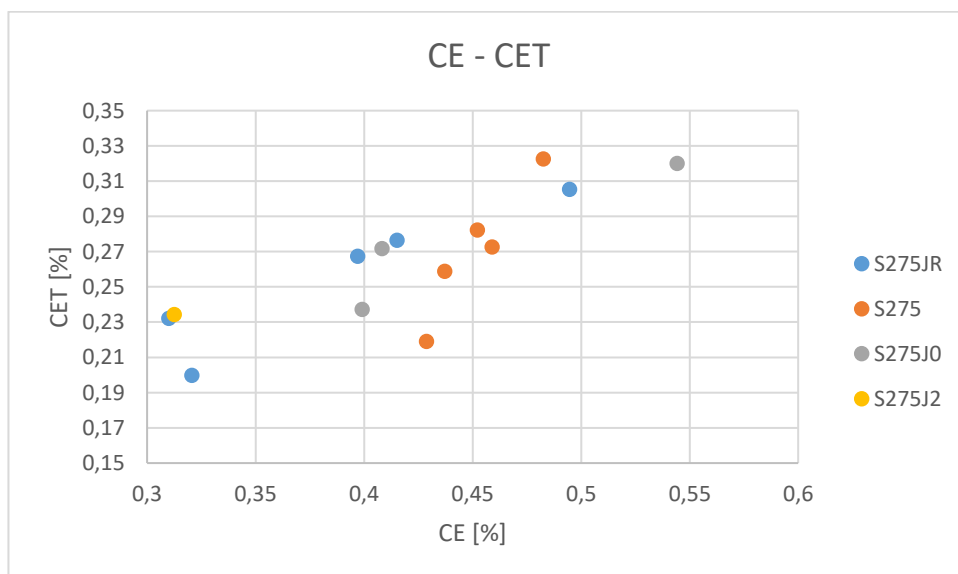
Fosfor a síra se v ocelích S275 vyskytují řádově v setinách až tisícinách, jak je vidno z grafu (graf 13). Posuzované vzorky se ve většině případů ani neblížily maximálním dovoleným obsahům a lze je tedy prohlásit za vhodné ke svařování, alespoň, co se koncentrace P a S týká. K těmto účelům se jako nejvhodnější jeví dle tohoto kritéria skupina ocelí S275JR, naopak nejvyšší zastoupení síry a fosfotu nacházíme u vzorky ocele S275J2.

Na rozdíl od předchozím prvků, byl u křemíku zaznamenán rozptyl 0,3 % (graf 14). Ve skutečnosti by byl rozptyl ještě větší (tab. 17), ale do grafu nebyly zaznamenány hodnoty převyšující maximální hodnotu výše zmíněnou normou. Lze pozorovat i fakt, že i oceli jedné skupiny (např. S275JR) jsou značně nesourodé, co se obsahu Si týká. Naopak hliník se v ocelích S275 soustředil do obsahů lehce převyšujících 0,05 %. Většina vzorků se však soustředila kolem hodnoty 0,03 %.



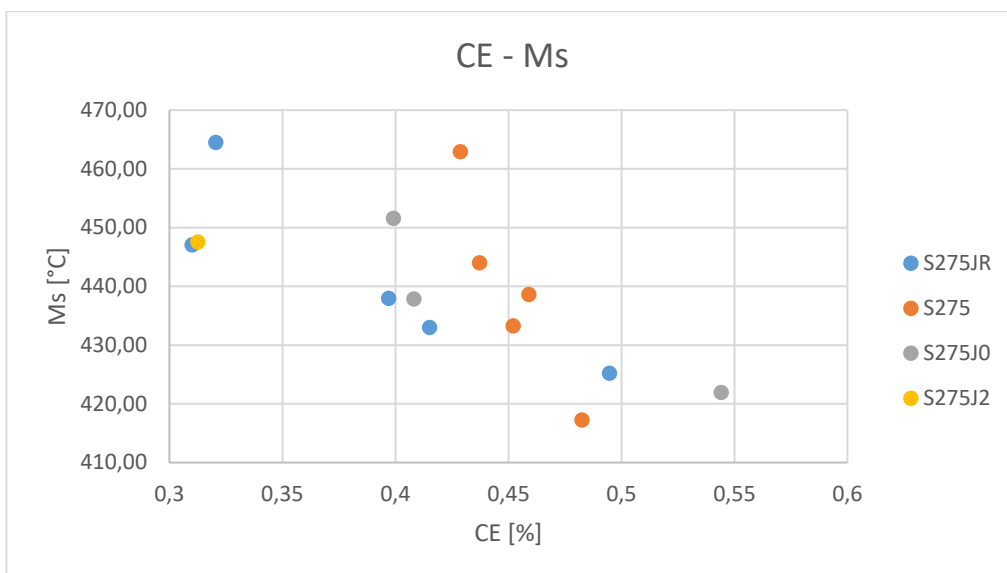
Graf 14 Obsahy Si a Al v ocelích S275

Mimo zastoupení jednotlivých prvků byly vyhodnocovány i závislosti chemického složení na charakteristikách ocelí, jako jsou teplota přehřevu T_p , teplota martenzit start M_s nebo teplota martenzit finish M_f . Chemické složení ocelí je reprezentováno hodnotami uhlíkových ekvivalentů CE a CET, jejichž hodnoty vykresluje graf (graf 15). Tyto hodnoty byly následně zkoumány v závislostech na výše zmíněných charakteristikách.



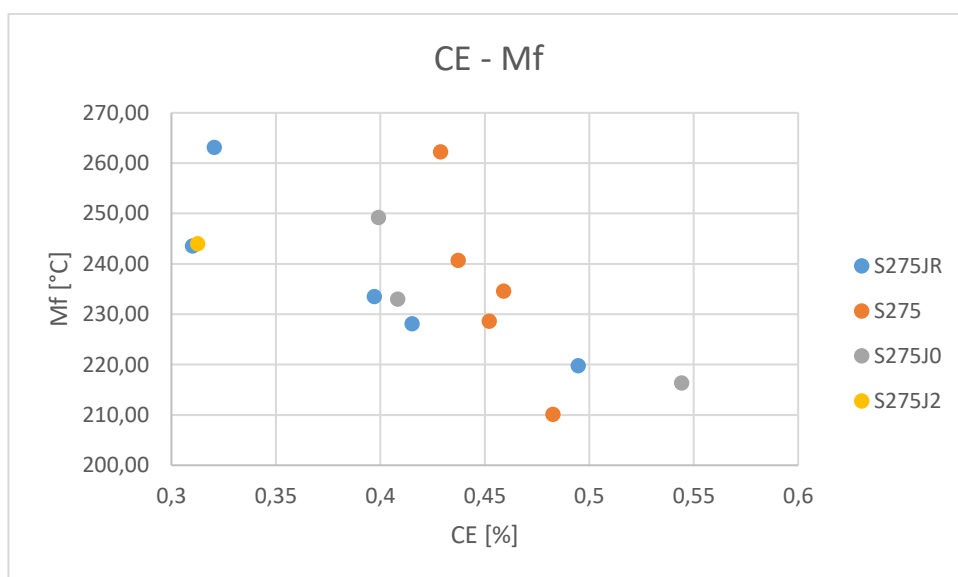
Graf 15 Vykreslení hodnot CE a CET pro oceli S275

Při vyhodnocování závislosti mezi chemickým složením ocelí zastoupeným hodnotami CE a teplotou martenzit start M_s byla pozorována klesající tendence M_s s rostoucími hodnotami CE. Nejmarkantnějšího poklesu si lze všimnout u blíže nespecifikovaných ocelí S275, kde teplota mezi hodnotami CE 0,43 až 0,48 klesne téměř o 50 °C. Naopak mnohem pozvolnější průběh poklesu teploty můžeme sledovat u ocelí S 275JR a S275J0. U ocelí S275JR lze také pozorovat vzorek, který ač má nejnižší hodnotu CE, teplota M_s není nejvyšší a linearitě se vymyká. To může být způsobeno malými až zanedbatelnými obsahy prvků, jako jsou nikl nebo chrom, které mají při výpočtu M_s větší váhu (2.4), než při výpočtu CE. Od toho se může odvíjet i rozptyl teploty M_s , která se blíží 50 °C.



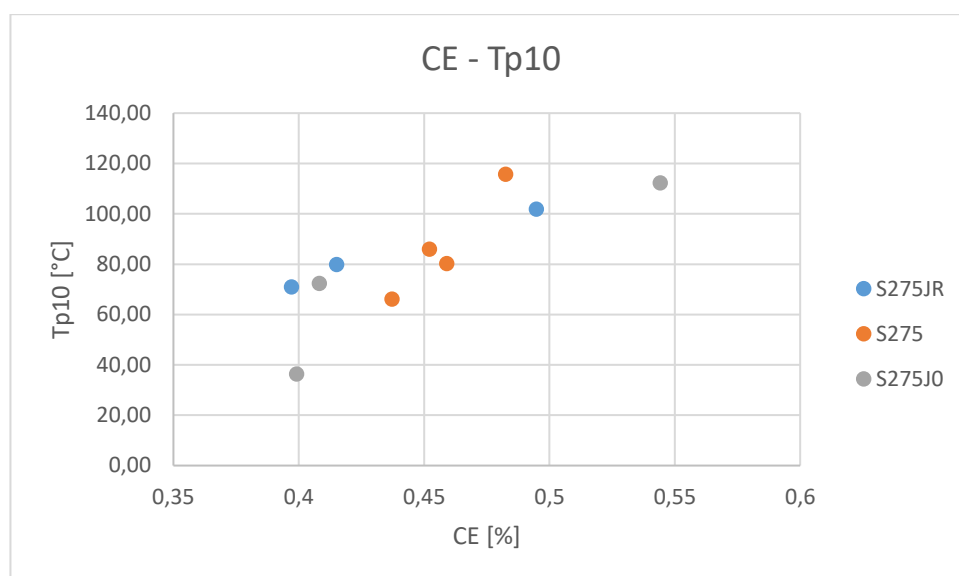
Graf 16 Závislost teploty Ms na CE pro oceli S275

Podobná závislost byla sledována i u závislosti chemického složení (opět reprezentovaného CE) a teplotou martenzit finish M_f (graf 16). Změnou je jen nepatrně vyšší rozptyl M_f , který o pár stupňů překročil hodnotu 50 °C. Jinak jsou závislosti jednotlivých ocelí téměř totožné s grafem předešlým.



Graf 17 Závislost teploty M_f na CE pro oceli S275

Další zkoumanou charakteristikou byla závislost CE na teplotě předehřevu T_p . Jelikož je tato teplota závislá i na tloušťce materiálu, byla pro všechny vzorky stanovena konstantní tloušťka $s = 10$ mm. Tím byl potlačen vliv tloušťky materiálu a byla zavedena tloušťka T_{p10} , která popisuje teploty předehřevů pro materiály o specifickém chemickém složení, ale o konstantní tloušťce.



Graf 18 Závislost teploty T_{p10} na CE pro oceli S275

Graf (graf 18) vykresluje závislost CE na výše definované teplotě T_{p10} . Z tohoto grafu lze vypočítat růst hodnot T_{p10} s rostoucími hodnotami CE a lze tedy mezi nimi vyvodit závislost.

Na relativně malém intervalu hodnot CE (přibližně od 0,4 do 0,55) je pozorován prudký nárůst teploty předehřevu a to z 36 °C až na 112 °C. Celkový rozptyl T_{p10} je tedy zhruba 76 °C. Lze si všimnout, že teplota předehřevu T_{p10} se vyskytuje až pro oceli, jejichž hodnota CE se blíží hodnotě 0,4. Pro materiály s nižšími hodnotami CE nebylo možné hodnoty T_{p10} vypočítat.

4.2.2 Diskuse výsledků ocelí S275

Následující podkapitola shrnuje výsledky zaznamenané při vyhodnocování zkoumaných dat. Tyto výsledky jsou rozříděny do tří kategorií a to na vyhodnocení chemického složení, závislých charakteristik a mechanických vlastností. Přičemž všechny tři tyto kategorie spolu souvisí a jsou navzájem propojeny. K vyhodnocovaným veličinám byly určeny hodnoty maxima, minima, průměrná hodnota, medián a rozpětí statistického souboru (R). Tyto hodnoty byly následně porovnávány s příslušnou normou upravující danou ocel.

Tab. 17 Vyhodnocení chemického složení ocelí S275.

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]
Norma	<i>max 0,23</i>	<i>max 0,35</i>	<i>max 1,6</i>	<i>max 0,035</i>	<i>max 0,035</i>		
MIN	0,08	0,014	0,49	0,008	0,004	0,01	0,003
MAX	0,22	0,4	1,47	0,04	0,05	0,3	0,02
PRŮMĚR	0,162	0,212	0,950	0,018	0,017	0,062	0,008
MEDIÁN	0,175	0,21	0,978	0,019	0,0135	0,02	0,006
R	0,14	0,386	0,98	0,032	0,046	0,29	0,017

Z tabulky (tab. 17) lze vyčíst, že i u ocelí S275 se objevovaly vzorky, jejichž chemické složení se vymykalo normě ČSN EN 10025 stanovující jejich maximální složení. Nadlimitního množství si můžeme všimnout u křemíku. U fosforu a síry taktéž, zde to však nemusí být zásadní, jelikož zde se maximální obsahy stanovují pouze pro oceli určené ke svařování. U ocelí S275 je možné sledovat velké rozpětí obsahů uhlíku a manganu, což může vést ke značným rozdílům mechanických vlastností (tab. 19).

Tab. 18 Vyhodnocení charakteristik závislých na chemickém složení ocelí S275.

	CE	CET	Ms [°C]	Mf [°C]	Tp10 [°C]
MIN	0,31	0,200	417,24	210,07	36,29
MAX	0,544	0,323	464,46	263,16	115,73
PRŮMĚR	0,419	0,264	440,17	236,19	82,15
MEDIÁN	0,422	0,270	438,28	234,06	80,04
R	0,234	0,123	47,22	53,09	79,44

Charakteristiky závislé na chemickém složení, jako jsou např. CE nebo CET shrnuje tabulka (tab. 18). Z průměrných hodnot CE lze opět usoudit, že tyto konstrukční oceli jsou zaručeně svařitelné a není pro ně nutný předehřev. To lze usoudit i s maximální hodnoty teploty předehřevu, která ani z daleka nedosahuje hraničních 150 °C.

Co se mechanických vlastností týká, lze říci, že zkoumané vzorky splňují kritéria daná normou (tab. 19). Vzhledem ke kolísání obsahů prvků ovlivňující pevnost ocelí se dalo předpokládat kolísání i hodnot pevností. Naopak se ale ukázalo, že rozpětí těchto hodnot je nejmenší ze všech tří typů zkoumaných ocelí. To však může být ovlivněno i počtem zkoumaných vzorků.

Tab. 19 Vyhodnocení mechanických vlastností ocelí S275.

	Reh (Rp0,2) [MPa]	Rm [MPa]	A [%]
<i>Norma</i>	<i>min 275</i>	<i>min 430</i>	<i>min 25</i>
MIN	294	443	26
MAX	350	518,5	36,8
PRŮMĚR	308,6	479,08	32,77
MEDIÁN	302	477	35,5
R	56	75,5	10,8

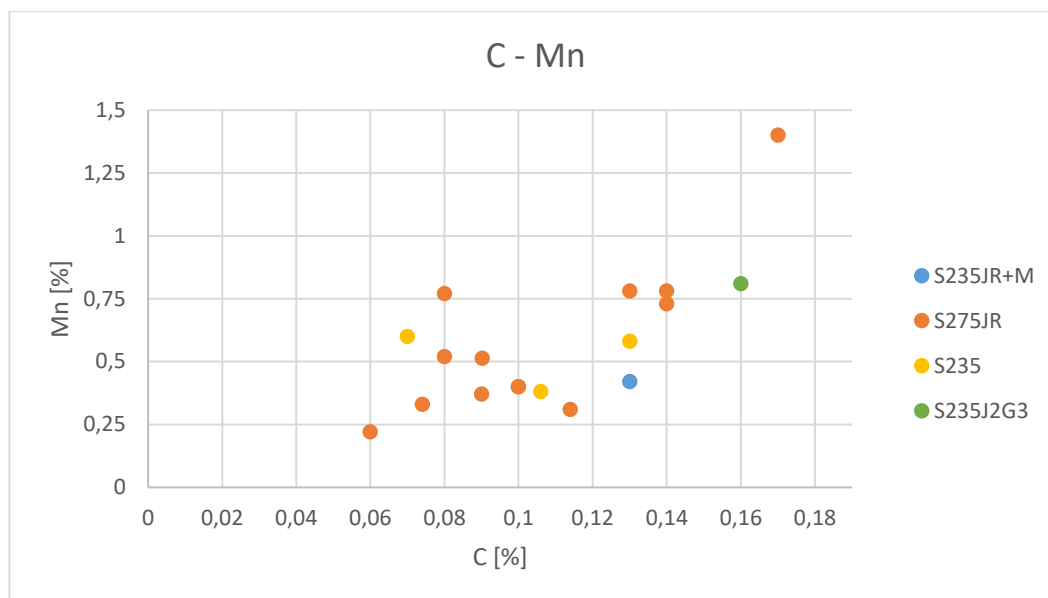
4.3 Oceli S235 [44], [51], [46], [3], [8], [69], [18], [42], [39], [35], [38], [75], [27], [31], [56], [54], [10], [1], [52], [21], [2]

Oceli S235 se řadí mezi neušlechtilé konstrukční oceli vhodné především ke svařování a to všemi obvyklými způsoby. Modifikace těchto ocelí mohou být vhodné i pro tváření a to jak za tepla, tak i za studena. Tyto oceli jsou využívány pro tenkostěnné konstrukce strojů, stavidla, méně namáhaná svařovaná potrubí atd.

Pro ocel S235 bylo vyhodnoceno celkem 19 vzorků, zastoupených ocelmi typu S235JR, S235JR+M, blíže nespecifikovanými ocelmi S235 atd (viz Příloha 3). Vyhodnocování ocelí S235 bylo zaměřeno na mechanické vlastnosti ocelí, jako je mez kluzu nebo mez pevnosti, dále pak na chemické složení ocelí a na závislosti mezi chemickým složením a charakteristikami ocelí, jako jsou teploty M_s a M_f . Vybrané hodnoty byly shrnuty a porovnány s příslušnou normou EN 10025.

4.3.1 Chemické složení ocelí S235

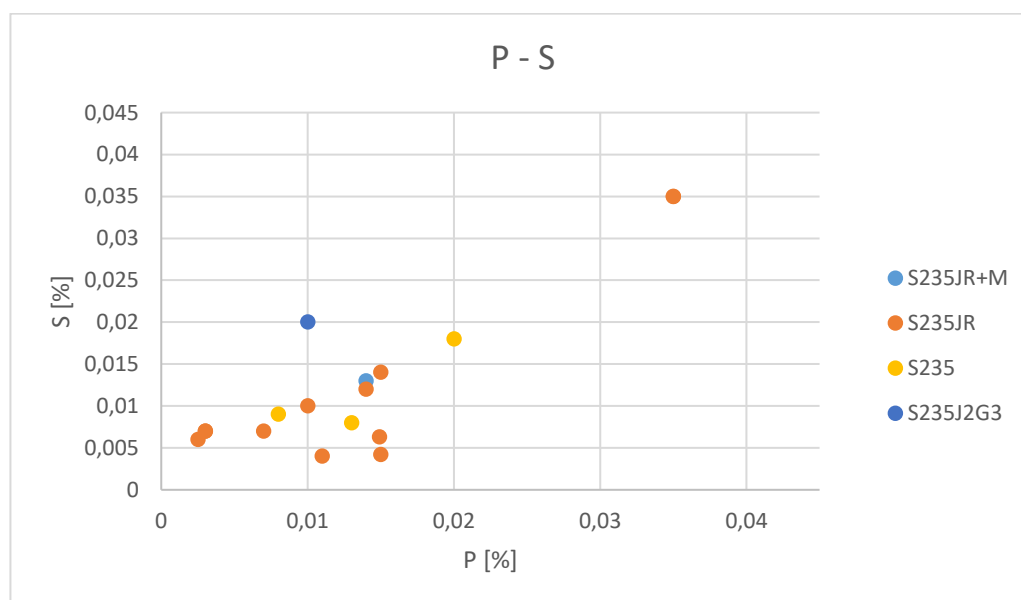
Vyhodnocení chemického složení ocelí S235 se zaměřilo na obsahy základních prvků v oceli, kterými jsou uhlík, mangan, dále pak na síru a fosfor. Následně byly vyhodnoceny hodnoty uhlíkových ekvivalentů CE a CET, které v následujících výsledcích reprezentovaly chemické složení daných ocelí.



Graf 19 Obsahy C a Mn v ocelích S235

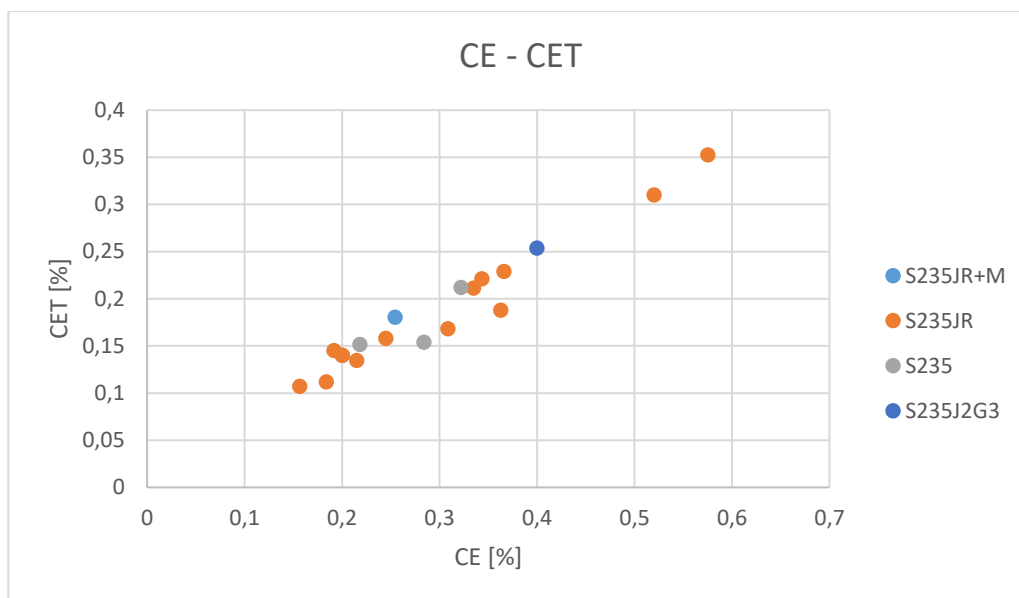
Z grafu (graf 19) lze vyčíst, že jak hodnoty obsahů uhlíku, tak hodnoty obsahů manganu značně kolísají a tvoří poměrně široký interval hodnot. To platí především pro mangan. U výskytu manganu v těchto ocelích je zajímavé i to, že jeho hodnota je ve většině případů pod úrovní 1 hm. %. Tento nízký obsah manganu potom vede k horším mechanickým vlastnostem (kap. 3.2).

Co se týká fosforu a síry, je u těchto ocelí snaha o jejich minimální zastoupení a to v důsledku požadavků na ocel (graf 20). Tyto oceli by měly mít zaručenou svařitelnost a je nutné je svařovat i v nepříznivých podmínkách (mráz, vlhkost). Vyšší koncentrace těchto prvků by pak znamenaly větší obtíže při svařování a větší nároky na technologii, které nejsou vždy možné. Proto se tyto prvky ve většině případů vyskytují do 0,02 %.



Graf 20 Obsahy P a S v ocelích S235

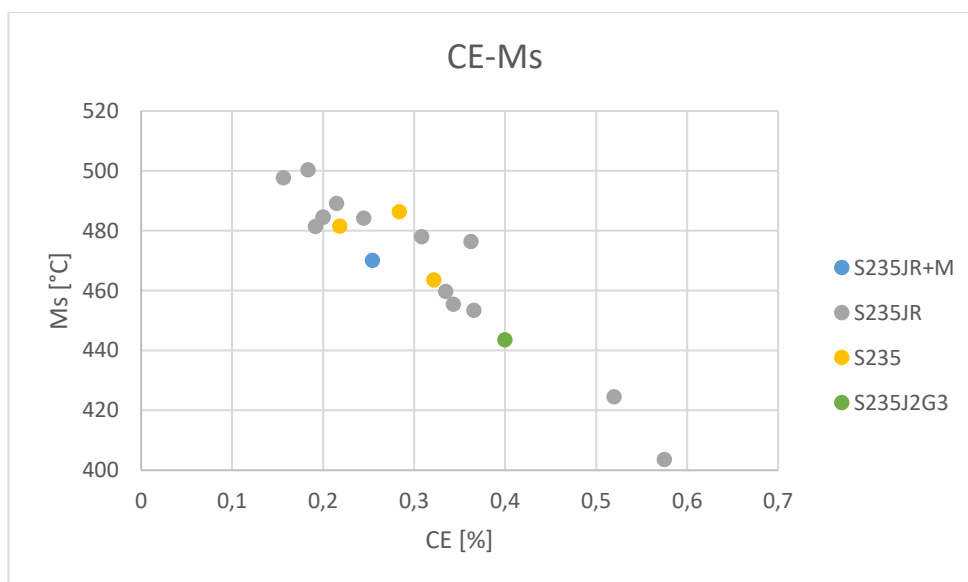
Pro vyhodnocení souvislostí mezi chemickým složením ocelí a teplotami M_s a M_f bylo nutné stanovit hodnoty uhlíkových ekvivalentů CE a CET (graf 21), které reprezentují chemické složení ocelí v daných vyhodnoceních.



Graf 21 Vykreslení hodnot CE a CET pro oceli S235

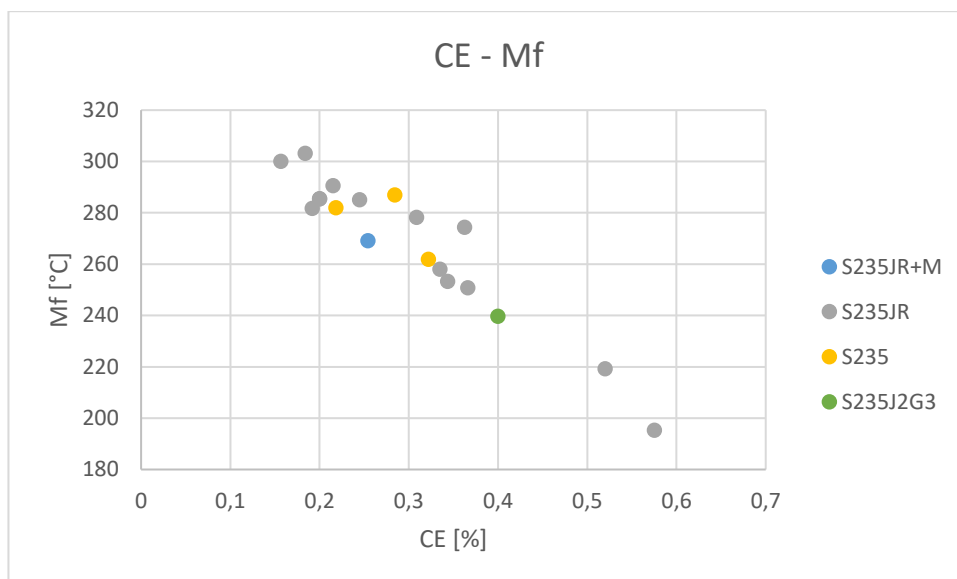
Na grafu (21) lze sledovat rostoucí lineární závislost mezi hodnotami ekvivalentů CE a CET. Uhlíkový ekvivalent CE nabývá hodnot od 0,16 až po 0,57. Většina hodnot je však menší než 0,4. Právě pro dvě vyjímky, jejichž hodnota CE > 0,5 lze spočítat T_{p10} . Tyto oceli mají tedy svařitelnost podmíněnou předehřevem.

Následující graf (22) popisuje závislost mezi chemickým složením ocelí a teplotou martenzit start (M_s). Z grafu je patrná klesající tendence hodnot martenzitické teploty se zvětšujícími se hodnotami uhlíkového ekvivalentu CE. Významný je i rozpětí teplot M_s , které se blíží ke 100 °C. Výrazný pokles teploty M_s a značné rozpětí zapříčiňují právě dva vzorky s vyššími hodnotami CE, které se z celého souboru vymykají.



Graf 22 Závislost teploty M_s na hodnotách CE pro oceli S235

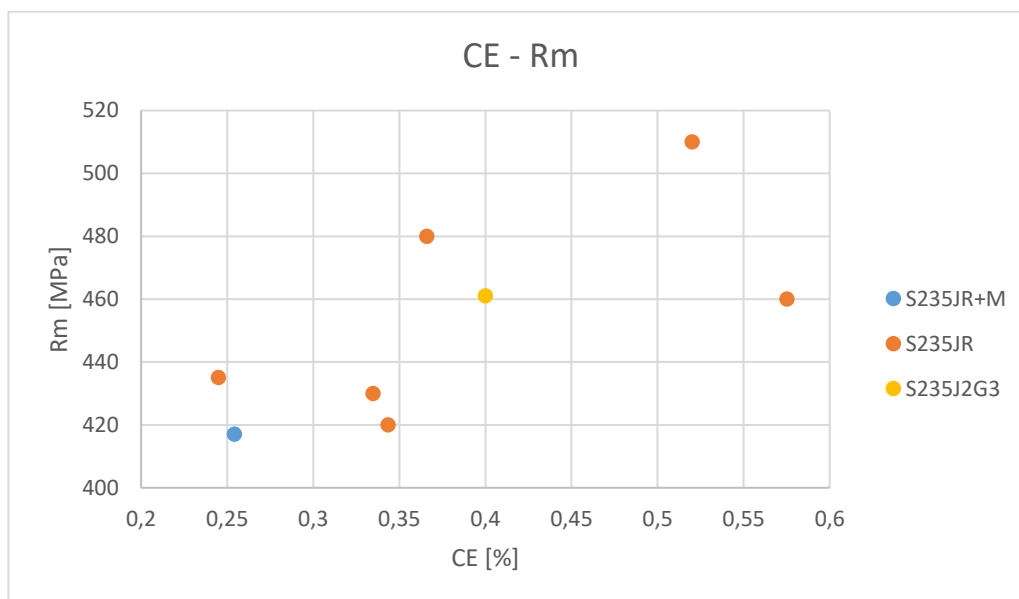
Mimo vyhodnocení závislosti $R_m - M_s$, byla vyhodnocena i závislost mezi M_s a teplotou martenzit finish M_f . Tu popisuje následující graf (23). Z toho vyplývá, že pro něj platí podobná charakteristika jako pro graf předešlý. A to, že s rostoucí teplotou CE postupně klesá teplota M_f . Ta začíná nad 300 °C a minima nabývá pod 200 °C. Rozpětí teploty M_f tedy překročilo 100 °C.



Graf 23 Závislost teploty Mf na hodnotách CE pro oceli S235

4.3.2 Mechanické vlastnosti ocelí S235

Z mechanických vlastností byly porovnávány mez pevnosti a mez kluzu, u některých vzorků byla zaznamenána i tažnost (viz Příloha 3). Vzhledem k nízkému počtu těchto vzorků však nebyla tato charakteristika oceli graficky vyhodnocována.



Graf 24 Závislost Rm na CE pro oceli S235

Graf (24) popisující závislost mezi chemickým složením ocelí S235 (zastoupeným uhlíkovým ekvivalentem CE) a mezi pevností není příliš průkazný v důsledku malého počtu vzorků. Lze však říci, že pro danou skupinu prvků se se zvyšující se hodnotou CE zvyšovala i mez pevnosti R_m .

4.3.3 Diskuse výsledků ocelí S235

Kapitola se zabývá vyhodnocením údajů z předešlých podkapitol (4.3.1, 4.3.2) a shrnutím těchto výsledků. Byly vyhodnocovány údaje týkající se chemického složení, závislých charakteristik a mechanických vlastností. Následně byly popisovány vzájemné souvislosti

a závislosti mezi těmito údaji. Pro zkoumané veličiny byla vždy určena hodnota maxima, minima, dále pak průměr, medián a rozpětí statistického souboru (R).

Vzhledem k chemickému složení konstrukčních ocelí S235 nebylo možné spočítat dle Seféniova vzorce (2.6) teplotu přehřevu pro tyto oceli. Z celkových 19 vzorků nabývala teplota přehřevu jen ve dvou případech logických parametrů. Z tohoto důvodu není do výsledného hodnocení nijak zakomponována.

Tab. 20 Vyhodnocení chemického složení ocelí S235.

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]
Norma	<i>max 0,19</i>	<i>max 0,35</i>	<i>max 1,5</i>	<i>max 0,045</i>	<i>max 0,045</i>		
MIN	0,06	0,005	0,22	0,0025	0,004	0,007	0,001
MAX	0,22	0,52	1,4	0,05	0,05	0,65	0,05
PRŮMĚR	0,115	0,171	0,601	0,016	0,015	0,133	0,015
MEDIAN	0,106	0,175	0,520	0,014	0,010	0,1	0,0084
R	0,16	0,515	1,18	0,048	0,046	0,643	0,049

Tab. 21 Vyhodnocení charakteristik závislých na chemickém složení pro oceli S235.

	CE	CET	Ms [°C]	Mf [°C]
MIN	0,157	0,107	403,56	195,22
MAX	0,575	0,353	500,34	303,16
PRŮMĚR	0,299	0,188	469,35	268,40
MEDIAN	0,284	0,168	478,03	278,17
R	0,419	0,246	96,78	107,94

Z tabulky (tab. 20) vyplývá, že i mezi ocelemi S235 se vyskytovaly vzorky neodpovídající svým chemickým složením normě ČSN EN 10025 upravující složení těchto ocelí. V podstatě kromě obsahu manganu se vždy vyskytl alespoň jeden vzorek překračující maximální povolené množství. Naopak v pořádku jsou mechanické vlastnosti, které normě vyhovovaly ve všech devatenácti zkoumaných vzorcích.

U chemického složení a tedy i charakteristik na něm závislých (tab. 21) jsou pozorovány velká rozpětí hodnot. To zejména prvků jako jsou uhlík nebo mangan. V této souvislosti by se daly předpokládat výkyvy hodnot meze pevnosti a meze kluzu. Zde však výrazná rozpětí pozorována nejsou (tab. 22). Naopak velké rozpětí je pozorováno u tažnosti, které se blíží pro oceli S235 téměř k 20 %, přičemž maximální hodnoty přesahují 50 %.

Tab. 22 Vyhodnocení mechanických vlastností ocelí S235.

	Reh (Rp0,2) [MPa]	Rm [MPa]	A [%]
Norma	<i>min 235</i>	<i>min 360</i>	<i>min 26</i>
MIN	235	417	33,8
MAX	320	510	52
PRŮMĚR	279,5	451,625	38,483
MEDIAN	292,5	447,5	36,35
R	85	93	18,2

4.4 Vzájemné porovnání ocelí S355, S275 a S235

Předešlé kapitoly se věnovaly srovnávání a vyhodnocování jednotlivých vzorků pro každý typ oceli zvlášť. V následující kapitole budou porovnávány jednotlivé typy ocelí navzájem, kdy budou vyhodnocovány jak rozdíly v chemickém složení ocelí a charakteristik na nich závislých, tak i rozdíly mechanických vlastností těchto ocelí.

4.4.1 Vzájemné porovnání chemického složení ocelí S355, S275 a S235 a závislých charakteristik

Z hlediska chemického složení byl brán zřetel zejména na obsahy uhlíku, manganu, fosforu, síry, chromu a molybdenu v ocelích. Chemické složení bylo pak globálně reprezentováno uhlíkovým ekvivalentem CE a vyhodnocováno vzhledem k souvisejícím charakteristikám, jako jsou teploty M_s , M_f a T_p .

Tabulka (tab. 23) udává obsahy základních prvků v ocelích, kdy byly opět vyhodnocovány maximum, minimum, průměr, medián a rozpětí statistického souboru. Tyto hodnoty byly dále doplněny hodnotami maximálních povolených obsahů definovaných normou.

Rozdílné chemické složení různých typů ocelí popisuje výše uvedená tabulka (tab. 23). Je možné sledovat výraznou změnu obsahů některých prvků. Například průměrný obsah uhlíku v ocelích S355 je téměř dvojnásobek uhlíku, co v ocelích S235. Stejně tak klesá i obsah křemíku v ocelích. To může mít dopad na rozdílné mechanické vlastnosti těchto ocelí (kap. 4.2.2). Vyšší obsah uhlíku může mít dále vliv na částečné zakalení oceli. Pro takové oceli je pak nutné použití předehřevu. O tom svědčí i hodnoty T_{p10} pro oceli S355 (tab. 24), kdy maximální hodnoty přesahují hranici 150 °C a je pro ně tedy předehřev nutný.

Prakticky na stejné úrovni jsou průměrné obsahy síry a fosforu a to řádově v setinách procenta. Tyto prvky mají při vyšším výskytu nepříznivé účinky na svařitelnost ocelí (kap. 3.4, 3.5) a jejich minimální hodnoty jsou tedy pro tyto oceli se zaručenou svařitelností žádoucí. Rozdílných průměrných hodnot si lze všimnout i u obsahů chromu a molybdenu. U ocelí S235 sledujeme výrazně nižší průměrné hodnoty chromu než u zbylých zkoumaných ocelí. To může vést k horší prokalitelnosti těchto ocelí (kap. 3.9). Naopak nejnižší zastoupení molybdenu pozorujeme u ocelí S275.

Tab. 23 Souhrnné porovnání chemického složení zkoumaných konstrukčních ocelí.

		C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]
S355	Norma	<i>max 0,24</i>	<i>max 0,6</i>	<i>max 1,7</i>	<i>max 0,04</i>	<i>max 0,04</i>		
	MIN	0,09	0,013	0,67	0,008	0,001	0,01	0
	MAX	0,29	0,89	1,6	0,04	0,035	0,14	0,12
	PRŮMĚR	0,160	0,298	1,320	0,016	0,013	0,0546	0,020
	MEDIÁN	0,16	0,31	1,39	0,015	0,011	0,05	0,01
	R	0,2	0,877	0,93	0,032	0,034	0,13	0,12
S275	Norma	<i>max 0,23</i>	<i>max 0,35</i>	<i>max 1,6</i>	<i>max 0,035</i>	<i>max 0,035</i>		
	MIN	0,08	0,014	0,49	0,008	0,004	0,01	0,003
	MAX	0,22	0,4	1,47	0,04	0,05	0,3	0,02
	PRŮMĚR	0,162	0,212	0,950	0,018	0,017	0,062	0,008
	MEDIÁN	0,175	0,21	0,978	0,019	0,0135	0,02	0,006
	R	0,14	0,386	0,98	0,032	0,046	0,29	0,017
S235	Norma	<i>max 0,19</i>	<i>max 0,35</i>	<i>max 1,5</i>	<i>max 0,045</i>	<i>max 0,045</i>		
	MIN	0,06	0,005	0,22	0,0025	0,004	0,007	0,001
	MAX	0,22	0,52	1,4	0,05	0,05	0,65	0,05
	PRŮMĚR	0,115	0,171	0,601	0,016	0,015	0,133	0,015
	MEDIAN	0,106	0,175	0,520	0,014	0,010	0,1	0,0084
	R	0,16	0,515	1,18	0,048	0,046	0,643	0,049

Chemické složení reprezentováno hodnotami uhlíkových ekvivalentů CE a CET a další charakteristiky jako jsou teploty M_s , M_f nebo T_{p10} shrnuje následující tabulka (tab. 24). V návaznosti na hodnoty mechanických vlastností (tab. 25) lze říci, že s klesající pevností a rostoucím obsahem uhlíku rostou i průměrné hodnoty uhlíkového ekvivalentu CE i CET, naopak klesá teplota M_s i M_f . Průměrná teplota přehřevu pro tloušťku $s = 10$ mm byla stanovena jen pro oceli S355 a S275. I zde ovšem lze tvrdit, že T_{p10} s rostoucími hodnotami CE a CET roste taktéž. To souvisí s obsahem uhlíku.

I když ocel S355 nabývá nejvyšších hodnot CE, nejvyšší rozptyl je pozorován právě u oceli S235, tedy u ocelí s průměrně nejnižšími hodnotami tohoto ekvivalentu. To může způsobovat značné komplikace ve výrobě, kdy oceli S235 s nižšími (až průměrnými) hodnotami CE nevyžadují přehřev a lze je svařovat za studena. Jak je ale patrné, může se vyskytnout vzorek s extrémními hodnotami, jehož hodnota CE přesahuje hraniční hodnotu 0,45 % a přehřev je pro něj nutný.

Dále lze pozorovat, že nejkonzistentnějších výsledků (tedy nejmenších rozptylů) je dosahováno u oceli S275, které svým chemickým složením a dalšími charakteristikami leží mezi ocelemi S355 a S235. Taková ucelenost výsledků je vhodná pro svařeče z hlediska zaručení svařitelnosti. V tomto případě však může být ovlivněna nedostatečným počtem zkoumaných vzorků.

Pokles teplot M_s a M_f v závislosti na růstu hodnot CE a CET je z praktického hlediska nepatrný. Například průměrná hodnota CE oceli S355 je téměř dvakrát vyšší, jak hodnota CE oceli S235. Průměrné teploty jsou M_s a M_f jsou však nižší jen o zhruba 40 °C.

Podobné je to i s teplotou přehřevu. Ta sice s rostoucími hodnotami CE a CET roste, ale taktéž ne příliš výrazně. Mezi průměrnými teploty T_{p10} pro oceli S355 a S275 je rozdíl pouze kolem 18 °C. Na druhou stranu u oceli S355 lze pozorovat mnohem větší rozptyl teplot, který překračuje hodnotu 120 °C. Vzhledem k nízkým hodnotám těchto teplot však není rozptyl nikterak znepokojující, jelikož pro většinu ocelí přehřev nebude nutný.

Tab. 24 Souhrnné porovnání charakteristik závislých na chemickém složení materiálů.

		CE [%]	CET [%]	M_s [°C]	M_f [°C]	T_{p10} [°C]
S355	MIN	0,308	0,207	367,189	154,810	53,161
	MAX	0,703	0,451	459,412	257,530	175,786
	PRŮMĚR	0,513	0,301	429,590	224,688	99,436
	MEDIÁN	0,508	0,302	431,053	226,381	99,379
	R	0,395	0,244	92,223	102,720	122,625
S275	MIN	0,31	0,19975	417,24	210,07	36,289
	MAX	0,5441	0,3225	464,459	263,16	115,730
	PRŮMĚR	0,419	0,264	440,174	236,193	82,147
	MEDIÁN	0,4219	0,2695	438,282	234,055	80,038
	R	0,234	0,123	47,219	53,090	79,441
S235	MIN	0,157	0,107	403,56	195,22	
	MAX	0,575	0,3525	500,338	303,16	
	PRŮMĚR	0,299	0,188	469,353	268,4	
	MEDIAN	0,284	0,168	478,026	278,17	
	R	0,419	0,246	96,778	107,94	

4.4.2 Vzájemné porovnání mechanických vlastností ocelí S355, S275 a S235

Z mechanických vlastností byly pro zkoumané oceli vyhodnocovány mez pevnosti, mez kluzu a tažnost ocelí (tab. 25). Z dostupných hodnot bylo určeno maximum, minimum, průměr, medián a také rozpětí statistického souboru. Tyto hodnoty byly vyjádřeny z toho důvodu, aby konečné srovnání nebylo zatíženo například jen maximální nebo minimální hodnotou, která se může vymykat skupině ostatních prvků.

Z tabulky (tab. 25) je patrné, že mez kluzu i mez pevnosti splňují požadavky dané příslušnou, výše zmíněnou, normou. Již z označení ocelí vyplývá, že nejvyšších hodnot meze pevnosti a meze kluzu nabývá právě ocel S355, dále pak ocel S275 a na konec S235. To souvisí i s obsahy uhlíku, křemíku nebo manganu v těchto ocelích (tab. 23). Ocele S355 vykazují nejvyšší zastoupení těchto prvků, což se odráží na hodnotách meze pevnosti a meze kluzu. Naopak nejnižší hodnoty obsahů těchto prvků pozorujeme u ocelí S235.

Zajímavé je i srovnání rozptylů meze kluzu a meze pevnosti. Zatímco u oceli S355 je rozptyl $R_{p0,2}$ 209 MPa, u oceli S275 je to v porovnání pouhých 56 MPa. U meze pevnosti R_m se už rozptyly takto extrémně nerozhází. Tyto vysoké hodnoty rozptylu meze kluzu mohou způsobovat problémy především ve výrobě a v provozu, kdy může docházet k odlišnému chování ocelí na pracovní podmínky a to i u stejných ocelí. Výkyvy a tím i velikost rozptylu může být ovlivněna jak chemickým složením jednotlivých ocelí, tak svou roli může hrát i rozdílné množství zkoumaných vzorků, jelikož pro ocel S355 byl počet vzorků několikanásobně vyšší, než pro oceli ostatní.

Dále stojí za zmínku rozdíl mediánu meze kluzu $R_{p0,2}$ a hodnotou udávající norma. U oceli S235 byl tento medián vyšší o téměř 60 MPa, zatímco ocel S275 byla průměrně naddimenzována o 28 MPa a ocel S355 dokonce jen o 22 MPa. Tento fakt může být ovlivněn především množstvím a charakteristikou zkoumaných vzorků.

Tab. 25 Souhrnné porovnání mechanických vlastností zkoumaných materiálů.

		Reh ($R_{p0,2}$) [MPa]	Rm [MPa]	A [%]
S355	Norma	<i>min 345</i>	<i>min 470</i>	<i>min 22</i>
	MIN	322	504	23,7
	MAX	531	622	41
	PRŮMĚR	391,679	555,025	30,625
	MEDIÁN	376,8	552,8	30
	R	209	118	17,3
S275	Norma	<i>min 275</i>	<i>min 430</i>	<i>min 25</i>
	MIN	294	443	26
	MAX	350	518,5	36,8
	PRŮMĚR	308,6	479,08	32,77
	MEDIÁN	302	477	35,5
	R	56	75,5	10,8
S235	Norma	<i>min 235</i>	<i>min 360</i>	<i>min 26</i>
	MIN	235	417	33,8
	MAX	320	510	52
	PRŮMĚR	279,5	451,625	38,483
	MEDIAN	292,5	447,5	36,35
	R	85	93	18,2

Další zkoumanou mechanickou vlastností byla tažnost ocelí A. Zde byly výsledky opačné výsledkům vyhodnocování R_m a $R_{p0,2}$. Tedy, že u oceli S355 byla vyhodnocena průměrně nejmenší tažnost ($A_{S355} = 30,6 \%$), u oceli S235 byla průměrná tažnost zkoumaných vzorků stanovena na $A_{S235} = 38,5 \%$. Mezi nimi figurovala hodnota oceli S275 ($A_{S275} = 32,8 \%$). Snížení tažnosti ocelí souvisí s obsahem manganu. Ten sice způsobuje zvýšení pevnosti, naopak však zapříčiňuje pokles tažnosti ocelí. Tento pokles tažnosti je však vzhledem ke zvýšení dalších mechanických vlastností mnohokrát zanedbatelný.

5 ZÁVĚRY

Práce se ve svém úvodu zabývá rozdělením a značením konstrukčních ocelí. Tato část byla zaměřena na značení dle českých a evropských norem. Dále se zabývá vlastnostmi a svařitelností konstrukčních ocelí, kdy je popisován význam uhlíkového ekvivalentu, vliv přehřevu a další charakteristiky upravující svařitelnost a vlastnosti ocelí. Následně se práce zabývá vlivem jednotlivých prvků na vlastnosti a tím i na svařitelnost oceli. Důraz je kladen především na prvky základní, jako jsou uhlík, křemík, mangan, fosfor a síra. Závěrečná kapitola práce se věnuje vyhodnocování vzorků ocelí S355, S275 a S235.

U těchto materiálů byly zkoumány rozdíly v chemickém složení a jejich vliv na mechanické vlastnosti a další charakteristiky jako jsou teploty M_s , M_f nebo T_p . Získané výsledky byly posuzovány nejprve pro každou skupinu jednotlivě, následně byly skupiny ocelí porovnávány i mezi sebou.

Při tomto porovnávání byl kladen důraz především na rozdílné hodnoty mechanických vlastností, jako je mez pevnosti, mez kluzu nebo tažnost. Dále pak na rozdíly hodnot uhlíkového ekvivalentu, který souvisí se svařitelností ocelí.

Byly pozorovány souvislosti mezi obsahy jednotlivých prvků ocelí a mechanickými vlastnostmi těchto ocelí. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku v ocelích se zvyšovaly i mechanické vlastnosti jako mezi pevností nebo mez kluzu. Naopak bylo zaznamenáno postupné snižování teplot M_s a M_f se zvyšujícími se hodnotami ekvivalentu CE, na který má obsah uhlíku největší vliv. K nejmarkantnějším poklesům těchto teplot docházelo u ocelí S235. Zde se teploty měnily až o 100 °C při změně CE o 0,42 %. Naopak nejkonzistentnější zůstávaly teploty M_s a M_f u ocelí S275, jejichž rozptyl se pohyboval kolem 50 °C.

Se zvyšujícím se obsahem uhlíku byl pozorován růst hodnot teploty přehřevu T_p . Tento jev se nejvýrazněji projevoval u ocelí typu S355, které z posuzovaných ocelí obsahovaly největší množství uhlíku. V extrémním případě překročila hodnota CE dokonce 0,7 %. To vedlo k závěru, že některé oceli S355, ač se zaručenou svařitelností, je nutné pro danou tloušťku materiálu přehřát.

Byly zkoumány i hodnoty tažnosti v důsledku výskytu manganu v ocelích. Bylo dospěno k závěru, že oceli s nižšími obsahy manganu dosahují vyšších hodnot tažnosti, naopak se však vyznačují nižšími hodnotami meze pevnosti a meze kluzu. Stejná závislost byla pozorována i ve vztahu tažnosti a uhlíkového ekvivalentu, kdy nejvyšší hodnoty tažnosti byly pozorovány u ocelí S235, jejichž průměrné hodnoty CE se od ostatních zkoumaných ocelí lišily až o desetiny procenta.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- 1 AKKAS, N., E. FERIK, E. ILHAN a S. ASLANTAR. The Effect of Nugget Sizes on Mechanical Properties in Resistance Spot Welding of S235JR(Cu) Steel Sheets Used in Railway Vehicles. *Physica polonica*. 2016, (130), 4.
- 2 AKKAS, N., E. ILHAN, F. VAROL a S. ASLANLAR. Welding Time Effect on Mechanical Properties in Resistance Spot Welding of S235JR(Cu) Steel Sheets Used in Railway Vehicles. *ACTA PHYSICA POLONICA*. 2016, (129), 3.
- 3 AKKAS, N., F. VAROL, E. FERIK, E. ILHAN, U. OZSARAC a S. ASLANLAR. Effect of Welding Current on Mechanical Properties of Welding Joints in S235JR(Cu) Steel Sheets in Resistance Spot Welding. *Physica Polonica*. 2014, (125), 3.
- 4 ASM handbook. Volume 6, Welding, brazing, and soldering. 6th print. Materials Park: ASM International, 2003, xvi, 1299 s. : il, čb. fot. ISBN 0871703823.
- 5 AXINTE, M., C. NEJNERU, M. PERJU, A.V. SANDU, M. AELENEP a M. COSTEA. Corrosion Behaviour of Some Steels in Black Sea Water. Technical University of Iasi, Faculty of Materials Science and Engineering, 2016.
- 6 BAPTISTA, C.A.R.P., B.C.B. VERSUTO, F. P. DE OLIVEIRA, M.A.S. TORRES a D.H.S. CASTA. MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF FLASH-WELDED JOINTS IN HSLA STEELS. 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering, 2011.
- 7 BENEDETTI, M., V. FONTANARI a C. SANTUS. Crack growth resistance of MAG butt-welded joints of S355JR construction steel. *Engineering Fracture Mechanics* [online]. 2013, (108), 11 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0013794413000349>
- 8 BESLIU, Mihail M., Ionelia VOICULESCU a Gheorge SOLOMON. EFFECTS OF DILUTION ON WELD OVERLAYS REALIZED WITH FLUX-CORED ARC WELDING (FCAW) PROCESS USING 309LV FILLER METAL ON THE S235JR STEEL. University POLITEHNICA of Bucharest, 2017.
- 9 BLECK, W., W. DAHL, A. NONN, L. AMLUNG, M. FELDMANN, D. SCHÄFER a B. EICHLER. Numerical and experimental analyses of damage behaviour of steel moment connection. *Engineering Fracture Mechanics* [online]. 2009, (76), 17 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S001379440900085X>
- 10 BOIKO, Irina a Didzis AVISANS. STUDY OF SHIELDING GASES FOR MAG WELDING. *Materials Physics and Mechanics*. 2013, (16), 9.
- 11 BOŠNJAK, Srdan M., Nebojša B. GNJATOVIĆ, Dejen B. MOMČILOVIĆ, Ivan LJ. MILENOVIĆ a Vladan M. GAŠIĆ. Failure analysis of the mobile elevating work platform. *Case Studies in Engineering Failure Analysis* [online]. 2015, (3), 8 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S2213290215000103>
- 12 BOŠNJAK, Srdan M., Zoran D. PETKOVIĆ, Ivana D. ATANASOVSKA, Garan Z. MILOJEVIĆ a Vaso M. MIHAJLOVIĆ. Bucket chain excavator: Failure analysis and redesign of the counterweight boom supporting truss columns. *Engineering Failure Analysis* [online]. 2013, (32), 12 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1350630713001465>
- 13 BRNIC, Josip, Marco CANADIJA, Goran TURKALJ a Domagoj LANC. Behaviour of S 355JO steel subjected to uniaxial stress at lowered and elevated temperatures and creep. *Bulletin of Materials Science* [online]. 2009, (33), 7 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://web.b.ebscohost.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/ehost/detail/detail?sid=301ed773-8d2d-4701-86fa-825079befc07%40sessionmgr120&vid=0&hid=129&bdata=Jmxhbm9Y3Mmc2l0ZT1laG9zdC1saXZl#AN=55266958&db=a9h>
- 14 CICERO, S., T. GACÍA, V. MADRAZO, I.A. CARRASCAL a E. RUIZ. Analysis of notch effect in load bearing capacity, apparent fracture toughness and fracture micromechanisms of ferritic–pearlitic steels. *Engineering Failure Analysis* [online]. 2014, (44), 22 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S135063071400154X>
- 15 CICERO, S., V. MADRAZO a T. GARCÍA. Analysis of notch effect in the apparent fracture toughness and the fracture micromechanisms of ferritic–pearlitic steels operating within their lower shelf. *Engineering Failure Analysis* [online]. 2014, (36), 21 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1350630713003506>
- 16 CICERO, S., V. MADRAZO a T. GARCÍA. Analysis of notch effect in the apparent fracture toughness and the fracture micromechanisms of ferritic–pearlitic steels operating within their lower shelf. *Engineering Failure Analysis journal homepage: www.elsevier.com/locate/* [online]. 2014, (36), 21 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1350630713003506>

- 17 CICERO, Sergio, F. GUTIÉRREZ-SOLANA a J.A. ÁLVAREZ. *Structural integrity assessment of components subjected to low constraint conditions*. Engineering Fracture Mechanics [online]. 2008, (75), 22 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S001379440700447X>
- 18 DAHECHE, B., M.T. HANNACHI a H. DJEBAILI. *FLARE TEST ON WELDED STEEL TUBES; 2D SIMULATION*. University of Khanchela, 2016.
- 19 DANĚK, Ladislav. *Technologie svařování [soubor přednášek]*. VUT Brno, 2016.
- 20 DŽUPON, Miroslav, Ladislav FALAT, Ján SLOTA a Pavol HVIZDOŠ. *Failure analysis of overhead power line yoke connector*. Engineering Failure Analysis [online]. 2013, (33), 9 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S135063071300160X>
- 21 FALKUS, J., K. MILKOWSKA-PISZCEK, M. RYWOTYCKI a E. WIELGOSZ. *The influence of the selected parameters of the mathematical model of steel continuous casting on the distribution of the solidifying strand temperature*. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2012, (55), 5.
- 22 FARROKHI, F., S.E. NIELSEN, R.H. SCHMIDT, S.S. PEDERSEN a M. KRISTIANSEN. *Effect of Cut Quality on Hybrid Laser Arc Welding of Thick Section Steels*. Physics procedia [online]. 2015, (78), 9 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1875389215015084>
- 23 FÜRBACHER, Ivan, Karel MACEK a Josef STEIDL. *Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty: kovy, plasty, keramika, kompozity*. Svazek 1. Praha: Dashöfer, 2001, 1 sv. (na volných listech). ISBN 8086229025.
- 24 GARCÍA, T. a S. CICERO. *Application of the Master Curve to ferritic steels in notched conditions*. Engineering Failure Analysis [online]. 2015, (58), 16 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S135063071530087X>
- 25 GARCÍA, T. a S. CICERO. *Application of the Master Curve to ferritic steels in notched conditions*. Engineering Failure Analysis [online]. 2015, (58), 16 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S135063071530087X>
- 26 GARCÍA, T., S. CICERO a V. MADRAZO. *APLICACIÓN DE LA CURVA MAESTRA A UN ACERO S275JR EN CONDICIONES ENTALLADAS*. Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, 2015.
- 27 GRUM, Janez a Matjaž ŽNIDARŠIČ. *Microstructure And Residual Stress Analysis After Laser Cladding Of Low-Carbon Steel With Powdery Sic, Stellite 6, And Stellite 481*. Materials Science Forum Vols. 2003, , 6.
- 28 HALBAUER, L., A. BUCHWALDER, R. ZENKER a H. BIERMANN. *Influence of EB Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Welded Joints in High Alloy TRIP/TWIP Steels*. Technical University Bergakademie Freiberg, 2015.
- 29 HAMERNÍK, Jan. *Úvod do metalografie*. In: Jhamernik.sweb [online]. Pelhřimov, 2006 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/Metalografie.htm>
- 30 HAMERNÍK, Jan. *Základy tepelného zpracování kovů* [online]. In: . Pelhřimov, 2006 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: http://jhamernik.sweb.cz/tepelne_zpracovani.htm
- 31 HANNACHI, Mohamed Tahar a Hamid DJEBAIL. *OPTIMIZATION OF PARAMETRES OF WELDING STEEL TUBES BY INDUCTION AT HIGHT FREQUENCY*. University of Cheikh Larbi Tébéssi, 2013.
- 32 HEINZE, C., A. PITTNER, M. RETHMEIER a S.S. BABU. *Dependency of martensite start temperature on prior austenite grain size and its influence on welding-induced residual stresses*. Computational Materials Science [online]. 2013, (69), 10 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0927025612007215>
- 33 HEINZE, C., C. SCHWENK a M. RETHMEIER. *Influences of mesh density and transformation behavior on the result quality of numerical calculation of welding induced distortion*. Simulation Modelling Practice and Theory [online]. 2011, (19), 13 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1569190X11000840>
- 34 HEINZE, C., C. SCHWENK a M. RETHMEIER. *Numerical calculation of residual stress development of multi-pass gas metal arc welding*. Journal of Constructional Steel Research [online]. 2012, (72), 8 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0143974X11002252>
- 35 HERGHELEGIU, Eugen, Miroslav RADOVANOVIC, Gheorghe BRABIE a Nicolae Catalin TAMPU. *INFLUENCE OF ABRASIVE MATERIAL QUANTITY ON SURFACE QUALITY GENERATED BY ABRASIVE WATER JET OPERATION*. International Journal of Modern Manufacturing Technologies. 2011, (3), 6.

- 36 HLUCHÝ, Miroslav, Rudolf PAŇÁK a Oldřich MODRÁČEK. *Strojírenská technologie 1. 2. díl, Metalografie a tepelné zpracování. 3., přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002, 173 s. : il. ; 21 cm. ISBN 8071832650.*
- 37 HONYSZ, R. a L.A. DOBRZAŃSKI. Influence *analysis of admixtures* on mechanical properties of non-alloy structural steels [online]. *b.r.*, 7 [cit. 2017-05-23].
- 38 HONYSZ, R. a L.A. DOBRZAŃSKI. Influence *analysis of admixtures* on mechanical properties of non-alloy structural steels. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2013, (61), 7.
- 39 HONYSZ, R. a L.A. DOBRZAŃSKI. Influence *analysis of admixtures* on mechanical properties of non-alloy structural steels. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2013, (61), 7.
- 40 HRIVŇÁK, Ivan. *Zvaritelnost' ocelí. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1979, 235 s.*
- 41 CHEN, Tai-Cheng, Chau-Chang CHOU, Tung-Yuan YUNG, Kun-Chao TSAI a Jiunn-Yuan HUANG. Wear behavior of thermally sprayed Zn/15Al, Al and Inconel 625 coatings on carbon steel. *Surface & Coatings Technology* [online]. 2016, (303), 8 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0257897216302109>
- 42 CHOTĚBORSKÝ, R., P. HRABĚ a A. KABUTEY. Change of mechanical properties in substrate during rewelding deposit. *Agricultural Engineering* [online]. 2011, (57), 5 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.agriculturejournals.cz/web/rae/>
- 43 JAREŠ, Vojtěch. *Metalografie ocele. 1. vyd. Praha: Nakladatelství ČSAV, 1960, 275 s. : il.*
- 44 KARGUL, T., E. WIELGOSZ a J. FALKUS. Application of Thermal Analysis Tests Results in the Numerical Simulations of Continuous Casting Process. *Archives of Metallurgy and Materials* [online]. 2015, (60), 5 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <https://www.degruyter.com/view/j/amm.2015.60.issue-1/amm-2015-0035/amm-2015-0035.xml>
- 45 KIRÁLY, F. Diagramy rozpadu austenitu vývojových čs. *konstrukčních ocelí a zvarových kovov. Košice, 1980.*
- 46 KLIMPEL, A. a J. GÓRKA. Computer aided structure prediction of 0H18N9 and S235JR steels laser welded joints. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2007, (21), 4.
- 47 LAUNERT, Benjamin, Michael RHODE, Arne KROMM, Hartmut PASTERNAK a Thomas KANNENGIESSER. Measurement and numerical modeling of residual stresses in welded HSLA component-like I-girders. *Welding in the World* [online]. 2016, (61), 7 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <https://link.springer.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1007/s40194-016-0413-x>
- 48 Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s. : il. ; 30 cm. ISBN 8085771853.
- 49 MERDER, T., M. WARZECHA a P. WARZECHA. Large-eddy Simulations of a Flow Characteristics in a Multi-strand Continuous Casting Tundish. *Archives of metallurgy and materials*. 2015, (60), 4.
- 50 MESSLER, Robert W. Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy. New York: John Wiley, 1999, 662 s. ISBN 0471253766.
- 51 MILKOWSKA-PISZCZEK, K. a J. FALKUS. Applying a Numerical Model of the Continuous Steel Casting Process to Control the Length of the Liquid Core in the Strand. *Archives of Metallurgy and Materials* [online]. 2015, (60), 6 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <https://www.degruyter.com/view/j/amm.2015.60.issue-1/amm-2015-0040/amm-2015-0040.xml>
- 52 MILKOWSKA-PISZCZEK, K. The Effect of Thermophysical Parameters on Temperature Distribution in the Primary Cooling Zone. *Archives of Metallurgy and Materials* [online]. 2016, (61), 4 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.imim.pl/archives>
- 53 NUGENT, Matthew A.H. a Zulfiqar A. KHAN. The effects of corrosion rate and manufacturing in the prevention of stress corrosion cracking on structural members of steel bridges. *The Journal of Corrosion Science and Engineering*. 2014, (17), 15.
- 54 ORUČ, M., H. BABAHMETOVIĆ a D. PIHURA. RESISTANCE TO ATMOSPHERIC CORROSION OF LOW-CARBON STEEL GRADE WT St 37-2. 2004.
- 55 OUTINEN, Jyri a Pentti MÄKELÄNEN. TRANSIENT STATE TENSILE TEST RESULTS OF STRUCTURAL STEEL S355 (RAEX 37-52) AT ELEVATED TEMPERATURES. *Rakenteiden Mekaniikka*. 1994, (28), 16.
- 56 PIETRZAK, K., D. KALIŃSKI, M. CHMIELEWSKI, T. CHMIELEWSKI, W. WLOSIŃSKI a K. CHOREGIEWICZ. Processing of intermetallics with Al₂O₃ or steel joints obtained by friction welding technique. 2Institute of Fundamental Technological Research, 2011.
- 57 PILOTO, P.A.G., Paulo VILA REAL, Luís MESQUITA a M.A.P. VAZ. Steel mechanical properties evaluated at room temperature after being submitted at fire conditions. Polytechnic Institute of Bragança, 2002.

- 58 PRIEST, A.H. An energy balance in crack *propagation and arrest*. *Engineering Fracture Mechanics* [online]. 1998, (61), 21 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0013794498000757>
- 59 Převodní tabulka značení ocelí. In: E-konstrukter [online]. 2013-2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/prevodni-tabulka-znaceni-oceli>
- 60 PTÁČEK, Luděk, Jaroslav CIHLÁŘ, Eduard DORAZIL, Rudolf FORET, Bohumil PACAL, Josef STEIDL, Jaroslav ŠENBERGER a Jiří ŠVEJCAR. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 1999, 350 s. ISBN 8072041304.
- 61 PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu. I. 2. opr. a rozš. vyd.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, xii, 516 s. : il. ISBN 8072042831.
- 62 REMES, H. A Theoretical Model to Predict Fatigue *Life of Laser Welded Joints*. Helsinki University of Technology, 2005.
- 63 ROZUMEK, Dariusz a Robert BAŃSKI. Crack growth rate *under cyclic bending* in the explosively welded steel/titanium bimetals. *Materials and Design* [online]. 2012, (38), 8 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0261306912000714>
- 64 SADOWSKI, Adam J., J. Michael ROTTER, Peter J. STAFFORD a Thomas UMMENHOFER. On the gradient of the yield plateau in structural *carbon steels*. *Journal of Constructional Steel Research* [online]. 2017, (130), 11 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0143974X16304771>
- 65 SADOWSKI, Adam J., J. Michael ROTTER, Thomas REINKE a Thomas UMMENHOFER. Statistical analysis of the material properties of selected structural carbon steels. *Structural Safety* [online]. 2015, (53), 10 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0167473014001131>
- 66 SALEM MILANI, Ali a Murat DICLELI. Low-cycle fatigue *performance of solid cylindrical steel components subjected to torsion at very large strains*. *Journal of Constructional Steel Research* [online]. 2017, (129), 16 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0143974X16305405>
- 67 SANTIAGO, Aldina, Luís Simões DA SILVA, Paulo Vila REAL, Gilberto VAZ a António Gameiro LOPES. EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE INFLUENCE OF CONNECTION TYPOLOGY ON THE BEHAVIOUR OF STEEL STRUCTURES UNDER FIRE. Department of Civil Engineering, University of Coimbra, 2011.
- 68 SHAFAR, M., P. KUCHARCZYK, N. VAJRAGUPTA, S. MÜNSTERMANN, A. HARTMAIER a W. BLECK. Modeling the microstructure influence on fatigue life variability in structural *steels*. *Computational Materials Science* [online]. 2014, (94), 15 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0927025614003851>
- 69 SIDAWI, J.A. a H. KHATIB. EVALUATION OF THE PROPERTIES OF S235JR STRUCTURAL CARBON STEEL IN LEBANON. *Lebanese Science Journal*. 2002, (3), 20.
- 70 ŚLEZAK, Tomasz a Lucjan ŚNIEZEK. A Comparative LCF *Study of S960QL High Strength Steel and S355J2 Mild Steel*. *Procedia Engineering* [online]. 2015, (114), 8 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1877705815016835>
- 71 SOLTYSIAK, Robert a Dariusz BOROŃSKI. Strain analysis at *notch root in laser welded samples using material properties of individual weld zones*. *International Journal of Fatigue* [online]. 2015, (74), 10 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0142112314003156>
- 72 SVOBODA, Pavel a Jan BRANDEJS. Výběry z norem *pro konstrukční cvičení*. Doplněné vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2016, 234 stran : ilustrace. ISBN 9788072048380.
- 73 SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a Jiří DVOŘÁČEK. *Základy konstruování*. Doplněné vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2016, 230 stran : ilustrace. ISBN 9788072049219.
- 74 SVOBODA, Pavel. *Základy konstruování: výběr z norem pro konstrukční cvičení*. Brno: CERM, 2001, 288 s. : il. ISBN 8072042149.
- 75 TUOMINEN, J., J. NÄKKI, H. PAJUKOSKI *et al.* LASER CLADDING WITH 15 KW FIBER LASER. Tampere University of Technology, 2005.
- 76 VILARINHO, L.O., W. LUCAS a S. RAGHUNATHAN. WET UNDERWATER WELDING OF C-MN STEEL USING FCAW PROCESS. 22nd International Congress of Mechanical Engineering, 2013.
- 77 Výpočet teploty předehřevu Tp. In: SVARINFO [online]. 2006 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/showpage.php?name=predehrev>
- 78 Výpočet uhlíkového ekvivalentu Cekv. In: SVARINFO [online]. 2006 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/showpage.php?name=cekv>

- 79 WALL, Ola. Dynamic crack propagation in large steel *specimens*. *Engineering Fracture Mechanics* [online]. 2002, (69), 15 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0013794401001114>
- 80 WIESLAWA PIEKARSKA, DOROTA GOSZCZYNSKA a ZBIGNIEW SATERNUS. Application of *analytical methods* for predicting the structures of steel phase *transformations in* welded joints. *Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics* [online]. 2015, 14(2), 61-72 [cit. 2017-05-24]. DOI: 10.17512/jamcm.2015.2.07. ISSN 22999965.
- 81 ZÁDĚRA, Antonín. Metalurgie [soubor přednášek]. VUT Brno, 2016.
- 82 ZHANG, Yan-Huzi a Stephan J. MADDOX. Fatigue *life prediction for toe ground welded joints*. *International Journal of Fatigue* [online]. 2009, (31), 13 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0142112309000048>
- 83 Značka ocelí DIN - EN - ČSN. In: *Salzgitter* [online]. b.r. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.salzgitter.cz/index.php?page=33>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	Tažnost	[%]
C _c	Ekvivalent pro výpočet T _p	[%]
C _e	Uhlíkový ekvivalent	[%]
CE	Uhlíkový ekvivalent dle IIW/IIS	[%]
CET	Uhlíkový ekvivalent	[%]
M _f	Teplota martenzit finish	[°C]
M _s	Teplota martenzit start	[°C]
R	Rozpětí statistického souboru	[-]
R _m	Mez pevnosti	[MPa]
R _{p0,2}	Mez kluzu	[MPa]
T _p	Teplota přehřevu	[°C]
T _{p10}	Teplota přehřevu pro konstantní tloušťku 10 mm	[°C]
s	Tloušťka materiálu	[mm]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 ARA diagram [zdroj]	20
Obr. 2 Modifikovaný ARA diagram [zdroj]	20
Obr. 3 Závislost mezi tvrdostí a zastoupením martenzitu.....	21
Obr. 4 Vliv napětí na vznik studených trhlin	21
Obr. 5 Diagram železo - uhlík.....	24
Obr. 6 Sulfidické vměstky II. typu.....	26
Obr. 7 Sulfidické vměstky IV. typu	26

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Klasifikace nelegovaných ocelí.	11
Tab. 2 Schéma značky dle evropského značení.	12
Tab. 3 Význam přidavných symbolů skupiny 1 pro značení konstrukčních ocelí.....	13
Tab. 4 Význam přidavných symbolů skupiny 2 pro značení konstrukčních ocelí.....	13
Tab. 5 Schéma číselného označování ocelí dle ČSN.	14
Tab. 6 Charakteristika tříd ocelí.	15
Tab. 7 Význam třetí číslice pro značení ocelí třídy 17.	16
Tab. 8 Význam třetí číslice pro značení ocelí třídy 19.	16
Tab. 9 Označení způsobů výroby ocelí.	16
Tab. 10 Příklady ekvivalentů konstrukčních ocelí. [zdroj].....	17
Tab. 11 Hodnoty maximálních obsahů prvků pro oceli vyhovující výpočtu Ce dle (2.1)...18	
Tab. 12 Mezní hodnoty ocelí, pro něž není třeba zvláštních opatření při svařování.	19
Tab. 13 Maximální hodnoty prvků v ocelích přípustných pro použití CE a CET.	19
Tab. 14 Vyhodnocení chemického složení ocelí S355.	34
Tab. 15 Vyhodnocení charakteristik závisejících na chemickém složení ocelí S355.....	34
Tab. 16 Vyhodnocení mechanických vlastností ocelí S355.....	35
Tab. 17 Vyhodnocení chemického složení ocelí S275.	39
Tab. 18 Vyhodnocení charakteristik závislých na chemickém složení ocelí S275.	40
Tab. 19 Vyhodnocení mechanických vlastností ocelí S275.....	40
Tab. 20 Vyhodnocení chemického složení ocelí S235.	44
Tab. 21 Vyhodnocení charakteristik závislých na chemickém složení pro oceli S235.	44
Tab. 22 Vyhodnocení mechanických vlastností ocelí S235.....	44
Tab. 23 Souhrnné porovnání chemického složení zkoumaných konstrukčních ocelí.	45
Tab. 24 Souhrnné porovnání charakteristik závislých na chemickém složení materiálů. ...	46
Tab. 25 Souhrnné porovnání mechanických vlastností zkoumaných materiálů.	47

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Obsahy C a Mn v ocelích S355	29
Graf 2 Obsahy P a S v ocelích S355	29
Graf 3 Obsahy Cu a Ni v ocelích S355	30
Graf 4 Vykreslení hodnot CE a CET ocelí S355	30
Graf 5 Závislost teploty Ms na CE pro oceli S355	31
Graf 6 Závislost teploty Mf na CE pro oceli S355	31
Graf 7 Závislost teploty přehřevu Tp10 na CE pro oceli S355	32
Graf 8 Závislost teploty přehřevu Tp10 na obsahu uhlíku pro oceli S355	32
Graf 9 Závislost Rm na CE ocelí S355	33
Graf 10 Závislost Rm na obsahu C v ocelích S355	33
Graf 11 Závislost Rm na obsahu Mn v ocelích S355	34
Graf 12 Obsahy C a Mn v ocelích S275	36
Graf 13 Obsahy P a S v ocelích S275	36
Graf 14 Obsahy Si a Al v ocelích S275	37
Graf 15 Vykreslení hodnot CE a CET pro oceli S275	37
Graf 16 Závislost teploty Ms na CE pro oceli S275	38
Graf 17 Závislost teploty Mf na CE pro oceli S275	38
Graf 18 Závislost teploty Tp10 na CE pro oceli S275	39
Graf 19 Obsahy C a Mn v ocelích S235	41
Graf 20 Obsahy P a S v ocelích S235	41
Graf 21 Vykreslení hodnot CE a CET pro oceli S235	42
Graf 22 Závislost teploty Ms na hodnotách CE pro oceli S235	42
Graf 23 Závislost teploty Mf na hodnotách CE pro oceli S235	43
Graf 24 Závislost Rm na CE pro oceli S235	43

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Chemické složení a charakteristiky ocelí S355 [70], [58], [15], [80], [24], [13], [12], [63], [7], [32], [79], [22], [20], [11], [82], [37], [33], [66], [47], [68], [9], [34], [64], [65], [71], [17], [55], [41]
- Příloha 2 Chemické složení a charakteristiky ocelí S275 [62], [14], [16], [26], [25], [5], [67], [38], [49], [6], [57], [53], [76]
- Příloha 3 Chemické složení a charakteristiky ocelí S235 [44], [51], [46], [3], [8], [69], [18], [42], [39], [35], [38], [75], [27], [31], [56], [54], [10], [1], [52], [21], [2]

Příloha 1

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Cu [%]	Mo [%]	V [%]	Ti [%]	Nb [%]	N [%]	Al [%]
S355J2	0,09	0,18	1,5	0,011	0,008	0,03	0,05	0,06	0	0,06	0	0,01	0,007	0,025
	0,09	0,16	1,48	0,019	0,004	0,05	0,05	0,09	0	0,05	0	0,01	0,008	0,029
	0,2	0,31	1,39	0,012	0,008	0,05	0,09	0,06	0,12	0,02	0,022			0,014
	0,17	0,31	1,25	0,021	0,028	0,14	0,1	0,2	0,02	0,004	0,012	0,003	0,008	0,034
	0,2	0,31	1,39	0,012	0,008	0,05	0,09	0,06	0,12	0,02	0,022			0,014
	0,12	0,39	1,29	0,012	0,002	0,015	0,024	0,016	0,005	0,004	0,001	0,032		0,037
	0,14	0,2	1,45	0,015	0,003	0,04	0,01	0,02	0,002	0,004	0,002	0,028	0,004	0,033
	0,17	0,04	1,54			0,02	0,04	0,08						0,07
S355	0,15	0,18	1,41	0,019	0,011							0,01		0,041
	0,09	0,33	1,53	0,011	0,003	0,11	0,08	0,06	0,01	0,001	0,001			0,049
	0,19	0,2	1,05	0,028	0,02	0,08	0,11							0,006

MIN	0,09	0,013	0,67	0,008	0,001	0,01	0,01	0	0	0,001	0	0,002	0	0,006
MAX	0,29	0,89	1,6	0,04	0,035	0,14	0,325	0,3	0,12	0,06	0,022	0,047	0,008	0,23
PRŮMĚR	0,160079	0,298158	1,320053	0,016126	0,013137	0,054607	0,071423	0,094757	0,019852	0,013868	0,005611	0,0187	0,005799	0,042091
MEDIÁN	0,16	0,31	1,39	0,015	0,011	0,05	0,05	0,06	0,01	0,004	0,002	0,015	0,0064	0,035
R	0,2	0,877	0,93	0,032	0,034	0,13	0,315	0,3	0,12	0,059	0,022	0,045	0,008	0,224

Příloha 1

	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	Rp0,2/Rm	A [%]	CE [%]	CET [%]	Ms [°C]	Mf [°C]	Tp10 [°C]
S355J2H	418	544	0,768382	36	0,487533	0,27935	438,1917	234,401	84,6127
					0,503367	0,28525	433,6767	230,111	94,68023
S355J2+N	419	569	0,73638		0,548833	0,3075	431,444	227,17	100,5298
					0,3075	0,207	459,412	257,53	
	359	546	0,657509	30	0,560633	0,325	420,639	214,68	116,7745
	400	584	0,684932	28,6	0,584133	0,34	414,901	208,27	125,6186
					0,5275	0,29425	433,852	229,31	97,35202
	420	570	0,736842		0,548833	0,3075	431,444	227,17	100,5298
	368	578	0,636678	30	0,570233	0,34515	415,023	208,44	121,6772
	531	594	0,893939	23,7	0,5048	0,280075	439,5445	235,873	86,4755
					0,316167	0,2095	458,341	256,34	
S355J2+AR	404	543	0,744015	31	0,474133	0,24805	453,806	251,852	53,16084
	362	521	0,694818	27	0,5122	0,31	427,842	222,66	102,4311
	484	603	0,802653	29	0,426	0,2865	430,662	225,58	83,4391
S355JR	360	622	0,578778		0,473123	0,252668	449,8931	247,6002	62,92153
	380	560	0,678571	30	0,471733	0,287675	431,5195	227,675	91,01683
	365	555	0,657658	28	0,533333	0,309	426,044	220,9	107,2033
	352	580	0,606897		0,5152	0,3078	425,2571	219,979	105,0486
					0,49165	0,31295	426,0855	220,794	98,2289
	369	531	0,694915	30	0,508	0,2968	430,2088	225,592	97,79144
					0,64	0,4	388,84	179,44	152,0252
S355J2G3							433,876	228,89	82,75113
	370	545	0,678899	25,7	0,542067	0,340725	410,9467	203,979	122,8287
S355J2G3C	322	588	0,547619	28,8	0,702933	0,45095	367,189	154,81	175,7857
S355K2G3	362	573	0,631763	31	0,484667	0,3135	419,523	213,39	107,4031
S355K2	367	531	0,691149	41	0,478833	0,25425	453,848	251,51	57,72348
S355J0	385,7	550,6	0,700509		0,5395	0,343	409,5	202,282	123,958

Příloha 1

	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	Rp0,2/Rm	A [%]	CE [%]	CET [%]	Ms [°C]	Mf [°C]	Tp10 [°C]
S355J2	442	525	0,841905	32	0,490333	0,24575	454,082	252,48	56,34529
	447	520	0,859615	33	0,489333	0,24625	454,448	252,8	56,34529
	374,6	557,6	0,671808		0,5955	0,35875	409,046	200,43	132,3768
	361	531	0,679849	30	0,5353	0,3165	425,476	219,67	109,6418
	374,6	557,6	0,671808		0,5955	0,35875	409,046	200,43	132,3768
					0,449967	0,25165	448,3802	245,782	60,68069
					0,5137	0,28845	435,024	230,898	93,64054
	385	531	0,725047	30,7	0,567	0,33	419,324	213,58	117,5674
S355	406,1	526,9	0,770734		0,5025	0,291	432,686	228,37	93,91486
	379	504	0,751984	37	0,506033	0,2545	451,596	249,41	71,14276
					0,475833	0,30175	423,795	218,06	103,6792

MIN	322	504	0,547619	23,7	0,3075	0,207	367,189	154,81	53,16084
MAX	531	622	0,893939	41	0,702933	0,45095	459,412	257,53	175,7857
PRŮMĚR	391,6786	555,025	0,706988	30,625	0,512808	0,301021	429,5898	224,6878	99,43553
MEDIÁN	376,8	552,8	0,692983	30	0,508	0,30175	431,053	226,381	99,37937
R	209	118	0,34632	17,3	0,395433	0,24395	92,223	102,72	122,6249

Příloha 2

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Cu [%]	Mo [%]	V [%]	Ti [%]	Nb [%]	N [%]	Al [%]
S275JR	0,18	0,26	1,18	0,012	0,009	0,018	0,085	0,06	0,012	0,02	0,022			0,034
	0,18	0,31	0,7	0,01	0,01	0,11	0,13	0,17						0,02
	0,12	0,22	0,77	0,019	0,026	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01				
	0,185	0,022	0,906	0,0105	0,0054	0,018								0,051
	0,18	0,21	0,52	0,014	0,024									0,006
S275	0,15	0,21	1,18	0,026	0,013	0,046	0,026	0,021	0,006	0,002	0,001			0,028
	0,14	0,19	1,16	0,016	0,014	0,017	0,018	0,023	0,003	0,002	0,001			0,03
	0,17	0,26	1,09	0,019	0,014	0,028	0,02	0,022	0,003	0,003	0,002			0,049
	0,22	0,1	0,65	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3					0,012	
	0,08	0,014	1,39	0,008	0,004					0,006	0,001	0,003		0,028
S275J0	0,13	0,2	1,05	0,018	0,006		0,03	0,03		0,013		0,002		0,026
	0,17	0,36	1,47	0,02	0,011	0,013	0,016	0,032	0,004		0,007			0,08
	0,18	0,4	0,75	0,02	0,02	0,1	0,05	0,17	0,02	0,01	0,01	0,02	0,0045	0,02
S275J2	0,18	0,21	0,49	0,023	0,027	0,02	0,01	0,08					0,005	0,038

MIN	0,08	0,014	0,49	0,008	0,004	0,01	0,01	0,02	0,003	0,002	0,001	0,002	0,0045	0,006
MAX	0,22	0,4	1,47	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,02	0,02	0,022	0,02	0,012	0,08
PRŮMĚR	0,161786	0,211857	0,950429	0,01825	0,016671	0,061818	0,063182	0,084364	0,008286	0,00825	0,006286	0,008333	0,007167	0,034167
MEDIÁN	0,175	0,21	0,978	0,0185	0,0135	0,02	0,026	0,032	0,006	0,008	0,002	0,003	0,005	0,029
R	0,14	0,386	0,98	0,032	0,046	0,29	0,29	0,28	0,017	0,018	0,021	0,018	0,0075	0,074

Příloha 2

	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	CE [%]	CET [%]	Ms [°C]	Mf [°C]	Tp10 [°C]
S275JR		518,5		0,494667	0,305225	425,1757	219,737	101,8644
	302	506	35,5	0,397	0,26725	437,948	233,5	70,94158
	294	453		0,3205	0,19975	464,459	263,16	
	350	487	26	0,4151	0,2765	432,9848	228,106	79,85064
				0,31	0,232	447,052	243,52	
S275				0,458933	0,2726	438,6162	234,61	80,22562
				0,437133	0,25875	443,9692	240,702	66,04869
				0,4521	0,2823	433,2387	228,571	85,97827
				0,4825	0,3225	417,24	210,07	115,7296
				0,4287	0,219	462,904	262,21	
S275J0	303	467		0,3991	0,23725	451,559	249,22	36,28877
				0,5441	0,32005	421,9315	216,333	112,2058
				0,408167	0,27175	437,815	232,96	72,33804
S275J2	294	443	36,8	0,3125	0,23425	447,545	244	
MIN	294	443	26	0,31	0,19975	417,24	210,07	36,28877
MAX	350	518,5	36,8	0,5441	0,3225	464,459	263,16	115,7296
PRŮMĚR	308,6	479,0833	32,76667	0,418607	0,264227	440,1742	236,1928	82,14714
MEDIÁN	302	477	35,5	0,4219	0,2695	438,2821	234,055	80,03813
R	56	75,5	10,8	0,2341	0,12275	47,219	53,09	79,4408

Příloha 3

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Cu [%]	Mo [%]	V [%]	Ti [%]	Nb [%]	N [%]	Al [%]
S235JR+M	0,13	0,195	0,42	0,014	0,013	0,05	0,03	0,09	0,006	0	0	0	0,006	0,017
S235JRC+AR	0,14	0,01	0,78	0,007	0,007	0,02	0,02	0,03	0,001	0,004	0,001	0,004	0,005	0,038
	0,13	0,009	0,78	0,014	0,012	0,03	0,01	0,03	0,001	0,004	0,001	0,005	0,005	0,035
S235JR	0,08	0,005	0,52	0,015	0,014	0,007	0,007	0,03	0,005					
	0,1	0,02	0,4	0,003	0,007									0,042
	0,114		0,31	0,015	0,0042									
	0,22	0,35	1,1	0,05	0,05	0,3	0,3							
	0,1	0,02	0,4	0,003	0,007									0,042
	0,14	0,34	0,73	0,01	0,01	0,13	0,15	0,11						0,03
	0,0902	0,164	0,513	0,0149	0,0063	0,0183	0,0481	0,273	0,0068					
	0,074		0,33	0,0025	0,006									
	0,08	0,26	0,77			0,12	0,12		0,02					
	0,06	0,16	0,22	0,011	0,004	0,15	0,27	0,31						0,007
	0,17		1,4	0,035	0,035								0,012	
S235	0,07	0,03	0,6	0,02	0,018	0,15	0,15	0,15	0,05	0,02				0,045
	0,13	0,25	0,58	0,013	0,008	0,08	0,1	0,32	0,013	0,001			0,01	0,033
	0,106	0,186	0,381	0,008	0,009	0,024	0,039	0,084	0,01	0,01	0,01	0,012		0,037
S235JRW	0,09	0,52	0,37	0,035	0,035	0,65	0,29	0,34	0,04				0,0058	
S235J2G3	0,16	0,22	0,81	0,01	0,02	0,13	0,09	0,08						0,04

MIN	0,06	0,005	0,22	0,0025	0,004	0,007	0,007	0,03	0,001	0	0	0	0,005	0,007
MAX	0,22	0,52	1,4	0,05	0,05	0,65	0,3	0,34	0,05	0,02	0,01	0,012	0,012	0,045
PRŮMĚR	0,1150	0,1712	0,6007	0,0156	0,0148	0,1328	0,1160	0,1539	0,0153	0,0065	0,0030	0,0053	0,0073	0,0333
MEDIAN	0,106	0,175	0,52	0,0135	0,0095	0,1	0,095	0,1	0,0084	0,004	0,001	0,0045	0,0059	0,037
R	0,16	0,515	1,18	0,0475	0,046	0,643	0,293	0,31	0,049	0,02	0,01	0,012	0,007	0,038

Příloha 3

	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	Rp0,2/Rm	A [%]	CE [%]	CET [%]	Ms [°C]	Mf [°C]
S235JR+M	250	417	0,59952	36,7	0,2542	0,18035	470,061	269,034
S235JRC+AR	281	420	0,669048	37	0,343333	0,2211	455,4645	253,199
	304	430	0,706977	36	0,334667	0,21135	459,7505	257,939
S235JR					0,214867	0,134525	489,1059	290,577
					0,2	0,14	484,54	285,4
					0,1915	0,145	481,354	281,734
	235	460	0,51087		0,575	0,3525	403,56	195,22
					0,2	0,14	484,54	285,4
	304	480	0,633333	35,4	0,365833	0,22875	453,36	250,79
	320	435	0,735632	52	0,244877	0,157948	484,1264	285,0446
					0,1565	0,107	497,666	300,034
					0,3085	0,168	478,026	278,17
					0,183667	0,11175	500,338	303,16
	235	510	0,460784		0,52	0,31	424,53	219,22
S235					0,284	0,15375	486,305	286,87
					0,3218	0,2118	463,5425	261,907
					0,21825	0,151475	481,5239	281,902
S235JRW					0,3625	0,18775	476,384	274,31
S235J2G3	307	461	0,665944	33,8	0,399833	0,25375	443,53	239,69

MIN	235	417	0,460784	33,8	0,1565	0,107	403,56	195,22
MAX	320	510	0,735632	52	0,575	0,3525	500,338	303,16
PRŮMĚR	279,5	451,625	0,622763	38,48333	0,298912	0,187726	469,353	268,4
MEDIAN	292,5	447,5	0,649638	36,35	0,284	0,168	478,026	278,17
R	85	93	0,274848	18,2	0,4185	0,2455	96,778	107,94